

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra stavebních hmot a diagnostiky staveb

Využití skelného nápeku ze spalování biomasy
Use of slag from biomass heating plants

Student:

Bc. Veronika Šulková

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Filip Khestl, Ph.D.

Ostrava 2014

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Veronika Šulková**

Studijní program: N3607 Stavební inženýrství

Studijní obor: 3607T021 Stavební hmoty a diagnostika staveb

Téma: **Využití skelného nápeku ze spalování biomasy**
Use of slag from biomass heating plants

Zásady pro vypracování:

Předmětem práce je podrobná charakteristika vlastností nápeku vznikajícího při spalování biomasy v kotli s ohledem na jeho využití jako hrubozrnného či jemnozrnného plniva či jako pojiva do betonu. Jedná se o odpadní surovinu skelného charakteru, která může obsahovat také popel a další znečišťující látky. Tento odpad bývá značně odlišný dle použitého druhu biomasy, teploty a doby spalování. V práci se předpokládá s aplikací více či méně pórovitého sklovitého nápeku, u kterého budou sledovány vhodné metody úpravy k jeho využití jako lehkého plniva či pojiva kompozitních materiálů, založených zejména na cementové bázi. Úpravy vstupní suroviny budou prováděny za současného stanovení vhodných receptur se zaměřením také na trvanlivostní charakteristiky výsledného materiálu.

Součástí práce bude zpracování teoretické části, ve které se diplomantka zaměří zejména na popis vzniku, složení a využití skelného nápeku ze zpracování biomasy. Dále zpracuje krátké rešerše všech ostatních vstupních surovin. Praktická část, včetně konkrétní metodiky práce bude navazovat na informace získané v rámci teoretického výzkumu.

Základní body praktické části:

1. Rešerše, volba, dovoz a úprava vstupních surovin.
2. Stanovení základních vlastností vstupních surovin.
3. Volba a příprava základních receptur na základě zjištěných vlastností vstupních surovin.
3. Ověřování vlastností připravených receptur. Základní fyzikálně-mechanické vlastnosti. Experimentální rozsah a konkrétní výběr jednotlivých zkušebních metod bude zvolen v průběhu zpracování závěrečné práce.
4. Provedení základních analytických metod zkoušení (např. DTA, mikroskop) pro popis vnitřní struktury materiálů, trvanlivostní charakteristiky.

Seznam doporučené odborné literatury:

- Svoboda L. a kol. : *Stavební hmoty*, JAGA Bratislava, 2005, 471 s., ISBN 80-8076-007-1.
- Pytlík, P.: *Technologie betonu*, 2. vyd. BRNO: VUT IUM, 2000. 390 stran. ISBN 80-214-1647-5.
- Voláková, P.: *Problematika spalování biomasy – tvorba strusky a skelných nápeků z biomasového na alkálie bohatého popela*, Ph.D.Thesis, VŠCHT Praha 2008.
- Hanus, V.: *Tavení popela z biomasy*, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. Diplomová práce, 49 stran.
- Touma, W.E., Fowler, D.W., Carrasquillo, R.L.: *Research Report ICAR 301-1F*, International Center for Aggregates Research, 2001

ČSN EN 12620+A1 (2008): *Kamenivo do betonu.*

ČSN EN 13055-1 (2004): *Pórovité kamenivo - Část 1: Pórovité kamenivo do betonu, malty a injektážní malty.*

ČSN EN 933-1 až 5: *sada norem pro zkoušení geometrických vlastností kameniva.*

ČSN EN 1097: *sada norem pro zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva.*

ČSN EN 1367-1 až 3: *sada norem pro zkoušení odolnosti kameniva vůči teplotě a zvětrávání.*

ČSN EN 1744-1až 3: *sada norem pro zkoušení chemických vlastností kameniva.*

ASTM C-1260-07: *Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method).*

ČSN EN 206-1 (2001): *Beton - Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda.*

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

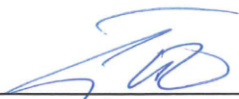
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Filip Khestl, Ph.D.**

Datum zadání: 28.02.2014

Datum odevzdání: 01.12.2014



Ing. Libor Žídek
vedoucí katedry



prof. Ing. Raďm Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 1. prosince 2014

.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- byla jsem seznámena s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat panu Ing. Filipu Khestlovi, Ph.D. za jeho odborné vedení. Také bych chtěla poděkovat panu Ing. Janu Hurtovi za výpomoc v laboratořích a ostatním zaměstnancům školní laboratoře VŠB-TUO fakulty stavební.

Zvláštní poděkování patří doc. Dr. Ing. Bohumíru Čechovi a Ing. Martinovi Hutníkovi za obstarání vstupní suroviny, bez které by se projekt nemohl realizovat.

Příspěvek byl realizován za finančního přispění MŠMT, podporou specifického vysokoškolského výzkumu - Studentské grantové soutěže VŠB - TU Ostrava pod identifikačním číslem SP2014/161.

Anotace

Práce se zabývá možnostmi stavebního využití skelného nápeku vznikajícího při spalování biomasy. Jedná se o odpadní surovinu skelného charakteru, která může obsahovat popel a další znečišťující látky. Vzhled, struktura i vlastnosti tohoto materiálu jsou velmi variabilní, závisí především na použitém druhu biomasy, zemině, teplotě a době spalování. Struktura bývá převážně porézní a sklovitá. Stavební materiály, ve kterých lze dle předpokladu uplatnit a vhodně využít vlastnosti tohoto nápeku jsou cementové či alkalicky aktivované kompozity. V těchto kompozitních materiálech může konkrétní nápek z Velkého Karlova figurovat vzhledem ke své pórovité struktuře jako lehké kamenivo, případně jej lze využít jako jemnozrnnou příměs I., ale i II. druhu. Při využití skelného nápeku jako lehkého plniva jsou zkoumány jeho chemické a fyzikálně-mechanické vlastnosti. Součástí diplomové práce jsou také základní zkoušky a využití jemně mletého skelného nápeku.

Klíčová slova

beton, skelný nápek, cement, kamenivo, geopolymery, odpadní suroviny, struska, popílek

Annotation

The work deals with possibilities using of glass slag produced during the combustion of biomass in building industry. It's a waste product with glass characteristic, which may also contain ash and other pollutants. This waste is significantly different according to the used types of biomass, soil, temperature and time of combustion. Structure of this material is mostly porous and glassy. Building materials, in which you can apply and use a good properties of this slag, are cementitious or alkali-activated composites. Slag, due of the nature, can be used as a lightweight filler or binder. When using glass slag as lightweight filler its physical and mechanical properties will be investigated. Basic characteristics were examined on the fine mill slag at which they were found out, among other, pozzolanic properties, thus the suitability of using this material as a partial substitute binders, such as cement. Next we research if the glass slag is possible for usage as a light filling for concrete. Then we will test physical and mechanical properties and if this waste material is even fit for construction industry.

keywords

concrete, glass slag, cement, aggregate, geopolymers, waste materials, slag, ash

Seznam použitého značení

AAS	alkalicky aktivované systémy
ASR	alkalicky křemičitá reakce
MPa	megapascal
N	newton
mm ²	milimetr čtvereční
l	litr
ρ	objemová hmotnost
m ³	metr krychlový
Mg/m ³	megagram na metr krychlový
g	gram
kg	kilogram
V	objem
m	hmotnost
A	plocha
mm	milimetr
T	teplota
°C	stupeň Celsia
g/cm ³	gram na centimetry krychlový
S	měrný povrch
cm ² /g	centimetr čtvereční na gram
t	čas
s	sekunda
ml	mililitr
E	modul pružnosti
R _f	pevnost v tahu za ohybu
F _f	zatěžovací síla
kg/m ³	kilogram na metr krychlový
R _c	pevnost v tlaku

Obsah

1. Úvod	11
2. Teorie	12
2.1 Biomasa	12
2.1.1 Zdroje biomasy.....	13
2.1.2 Vznik nápeku v kotlích.....	14
2.1.3 Problematické chování biomasového popela ve výtopnách	14
2.1.4 Princip přívodu slámy do kotle	15
2.1.5 Problematika skelný nápek	17
2.1.6 Charakteristická struktura skelného nápeku	17
2.2 Odpady využívané ve stavebnictví.....	19
2.2.1 Popílek.....	20
2.2.2 Vysokopeční struska	21
2.2.3 Energosádrovec.....	23
2.2.4 Křemičitý úlet	23
2.3 Cement.....	24
2.3.1 Historie cementu.....	25
2.3.2 Výroba cementu.....	26
2.3.3 Druhy cementu	33
2.4 Alkalicky aktivované systémy (AAS).....	34
2.4.1 Historie geopolymérů	36
2.4.2 Aktivátor.....	39
2.4.3. Vodní sklo.....	39
2.5 Kamenivo	41
2.5.1 Přírodní kamenivo	43
2.5.2 Umělé kamenivo	44
2.5.3 Recyklované kamenivo.....	45
2.5.4 Pórovité kamenivo	45
3. Cíl práce	51
4. Metodika.....	52

4.1 Vývoj diagramu metodiky	52
5. Popis fyzikálních a mechanických zkoušek	53
5.1 Příprava skelného nápeku	53
5.2 Plnivo	54
5.2.1 Stanovení objemové hmotnosti.....	54
5.2.2 Stanovení sypané hmotnosti kameniva	56
5.2.3 Tvarový index	57
5.2.4 Sítový rozbor	59
5.2.5 Stanovení mrazuvzdornosti	61
5.3 Jemnozrnný materiál	62
5.3.1 Stanovení měrné hmotnosti pyknometricky	63
5.3.2 Stanovení sypané hmotnosti	64
5.3.3 Stanovení měrného povrchu práškových látek - Blainova metoda	65
5.3.4 Stanovení sedimentace - Andreasenova metoda	67
5.3.5 Metody stanovení pucolánové aktivity.....	68
5.3.6 Stanovení normální hustoty - Vicatuv Přístroj	70
5.3.7 Stanovení doby tuhnutí.....	71
5.3.8 Kalorimetrie	72
5.4 Chemická analýza	72
5.4.1 Difrakce výkvetu a skelného nápeku (Měření amorfního podílu)	72
5.4.2 Prvková analýza skelného nápeku a výkvetu pomocí Spektrometru NITON XL3T GOLDD.....	72
5.4.3 Analýza skelného nápeku pomocí RTG diraktometru D8 Advance firmy Bruker AXS	73
5.4.4 Potenciometrické stanovení pH skelného nápeku a výluhu.....	75
5.5 Analýza výluhu skelného nápeku.....	76
5.5.1 Stanovení chloridů	77
5.5.2 Stanovení obsahu síranů.....	78
6. Aplikace skelného nápeku do cementových malt, betonů a AAS.....	80
6.1 Receptura.....	80
6.2 Příprava.....	82

6.2.1 Cementové a alkalicky aktivované malty, zkušební tělesa, míchání, zrání.....	82
6.2.2 Cementové betony a geopolymery, zkušební tělesa, míchání, zrání	85
6.3 Stanovení mechanických vlastností.....	90
6.3.1 Stanovení pevnosti v tahu za ohybu cementových a alkalicky aktivovaných malt .	90
6.3.2 Stanovení pevnosti v tahu za ohybu cementových betonů a geopolymerů	92
6.3.3 Stanovení pevnosti v tlaku cementových a alkalicky aktivovaných malt	94
6.3.4 Stanovení pevnosti v tlaku cementových betonů a geopolymerů	95
6.3.5 Stanovení statického modulu pružnosti	96
7. Výsledky zkoušek	98
7.1 Plnivo	98
7.1.1 Stanovení objemové hmotnosti.....	98
7.1.2 Stanovení sypané hmotnosti kameniva	98
7.1.3 Tvarový index	99
7.1.4 Sítový rozbor	99
7.1.5 Stanovení mrazuvzdornosti	100
7.2 Jemnozrnný materiál	100
7.2.1 Stanovení měrné hmotnosti pyknometricky	100
7.2.2 Stanovení sypané hmotnosti	101
7.2.3 Stanovení měrného povrchu práškových látek - Blainova metoda.....	101
7.2.4 Stanovení sedimentace - Andreasenova metoda	102
7.2.5 Stanovení pucolánové aktivity - Chappelle test.....	103
7.2.6 Stanovení normální hustoty - Vicatuv Přístroj	103
7.2.7 Stanovení doby tuhnutí.....	103
7.2.8 Kalorimetrie	104
7.3 Chemická analýza	104
7.3.1 Difrakce výkvětu a skelného nápeku (Měření amorfního podílu)	104
7.3.2 Prvková analýza skelného nápeku a výkvětu pomocí Spektrometru NITON XL3T GOLDD.....	105
7.3.3 Analýza skelného nápeku a výkvětu pomocí RTG diraktometruD8 Advance firmy Bruker AXS.....	108
7.3.4 Stanovení pH skelného nápeku a výluhu	112

7.3.5 Analýza výluhu skelného nápeku	115
7.3.6 Stanovení chloridů	116
7.3.7 Stanovení obsahu síranů	117
7.4 Stanovení mechanických vlastností	117
7.4.1 Stanovení pevnosti v tahu za ohybu cementových a alkalicky aktivovaných malt	118
7.4.2 Stanovení pevnosti v tahu za ohybu cementových betonů a geopolymérů	119
7.4.3 Stanovení pevnosti v tlaku cementových a alkalicky aktivovaných malt	119
7.4.4 Stanovení pevnosti v tlaku cementových betonů a geopolymérů	120
7.4.5 Stanovení statického modulu pružnosti	123
8. Závěr	125
9. Literatura	130
Seznam obrázků:	136

1. Úvod

Tématem diplomové práce je „Využití skelného nápeku ze spalování biomasy“. Hlavním důvodem, který nás vede k využívání organických paliv namísto anorganických, je výrazná úspora přírodních zdrojů. Jejich kapacity jsou dané a tyto zdroje by tak při neohospodárném využívání zbytečně brzo vymizely z povrchu zemského. Pokud je tedy jejich úspora možná, měla by být vždy naší vysokou prioritou. Zásadní výhodou organických paliv je bezesporu jejich schopnost rychlé regenerace. Tato je dána poměrně rychlým růstem rostlin včetně různých druhů dřevin. Další výhodou využití organických paliv je fakt, že při jejich spalování dochází k nižšímu emisnímu zatížení životního prostředí znečišťujícími látkami vypouštěnými do ovzduší. Tento fakt je třeba v dnešní době hodnotit obzvláště pozitivně.

Vzhledem k výše uvedenému, není nikterak překvapující, že i v České republice se během posledních několika let zvýšil počet tepláren, které využívají ke spalování různé typy slámy (řepka, pšenice, atd.), dřevní štěpku a pelety. Tento trend je zcela logický, vzhledem k rostoucím cenám za energie. Mnoho výrobců a dokonce i měst tak může při využití těchto organických alternativních a "levných" paliv vytvářet nezanedbatelné finanční úspory.

V současné době je odpad ze spalování biomasy využíván převážně jako hnojivo na zemědělské půdy. Přesto, že obsahuje určité stopové množství těžkých kovů, svojí pórovitou strukturou přispívá k provzdušnění zeminy a k ochraně plodin před mrazem.

Cílem práce je získání informací o vlastnostech nápeku jako suroviny potenciálně využitelné v oblasti zpracování stavebních hmot. Základní otázkou je, zda je tato odpadní surovina vhodná jako plnivo do betonů a malt s cementovou maticí nebo od alkalicky aktivovaných materiálů. Využití jemně mletého nápeku jako příměsi a případná pojivová schopnost nápeku je rovněž okrajovou částí diplomové práce. Jako surovina je v práci uvažován více či méně pórovitý sklovitý nápek získaný z teplárny na biomasu ve Velkém Karlově a který by potenciálně mohl najít využití coby lehké plnivo nebo i pojivo kompozitních materiálů, založených právě na cementové nebo alkalicky aktivované bázi.

2. Teorie

2.1 Biomasa

Pojmem biomasa se označují všechny rostlinné a živočišné organismy, které se převážně používají k energetickému účelu. Používá se hlavně při vytváření tepelných a elektrických energií.

Při výrobě stavebních materiálů a výrobků se v čím dál větší míře využívá šetrnějších surovin a technologií zpracování tak, aby bylo co nejméně ovlivněno životní prostředí a přírodní zdroje. Tento pozvolný proces je výsledkem pokrokovějšího myšlení lidí a normových požadavků, které se čím dál více promítají do stavebního průmyslu. Jednou z možností je využití biomasy (dřevo, sláma, konopí, len, atd.).

Trendem dnešní doby je co nejšetrnější zasahování do životního prostředí. Z tohoto vychází i snaha o co nejmenší vypouštění škodlivých látek do ovzduší. Jednoduše řečeno eliminovat emise CO₂ vypouštěné z elektráren a tepláren, a to tím, že jako tuhé palivo jsou používány biomasy, které při spalování produkují malé množství CO₂. Výtopny spalující biomasu jsou schopny zajistit teplo pro celou vesnici nebo část města, ale také mohou zajistit přívod teplé vody po celý rok. Mají přínosný hospodářský, ekologický a demografický vliv. Využitím rostlinné biomasy jako obnovitelného zdroje energie nám zajišťuje v daném regionu nová pracovní místa v oblasti zemědělství. [1]

V souvislosti s eliminací emisí skleníkových plynů Česká republika podepsala 23. 11. 1998 kjótský protokol (protokol k Rámcové úmluvě OSN o změně klimatu) na základě usnesení vlády č. 669/1998 a ratifikování 15. 11. 2001(č. 81/2005 Sb.m.s). Protokol obsahuje celkem 190 smluvních stran.

Zúčastněné země kjótského protokolu se umluvily v prvním kontrolním období (2008-2012), že zredukují emise skleníkových plynů nejméně o 5,2 %. Česká republika tento limit splnila s rezervou 8 %. Další kontrolní období je stanoveno 2013-2020, kde se zúčastněné země zavázaly ke snížení emisí skleníkových plynů nejméně o 18 %. [26]

Redukce se týkají emisí oxidu uhličitého CO₂, methanu CH₄, oxidu dusného N₂O, hydrogenovaných fluorovodíku (HFC_s), polyfluorovodíku (PFC_s) a fluoridu sírového (SF₆), vyjádřených ve formě ekvivalentu CO₂ (tzv. uhlíkový ekvivalent) antropogenních emisí. [26]

V České republice je několik tepláren založených na bázi spalování biomasy (např. pšeničná sláma, řepková, odpadní suroviny jako jsou dřeviny, konopné pazdeří atd.). Tyto stavby se nachází hlavně v blízkosti zemědělských lokalit.

Komunálních výtopen, pro které se rostlinná biomasa hodí nejvíce, je dosud realizováno poměrně málo. Důvodem je skutečnost, že spalování rostlinného materiálu je spojeno s některými problémy. Jedním ze zásadních je nízká eutektická teplota zbylého biomasového popela, která ovlivňuje následné čištění zařízení a opravy, ale i spotřebu elektrické energie. [1]

2.1.1 Zdroje biomasy

Biomasu lze rozdělit na odpadní a záměrně pěstovanou.

1) odpadní biomasa:

Do této kategorie se zařazuje sláma, lesní odpad, odpad z živočišné i rostlinné výroby, zbytky z dřevozpracujícího průmyslu, potravinářského průmyslu a dalších příslušných odvětví.

Využitím odpadních surovin z předešlé výrobní produkce pomáháme zabránit rozšiřování skládek, na kterých by jich pak většina skončila. Z volně ležící slámy na zemi lze například vytvořit balíky slámy, pelety nebo ji spalovat jako volně ložené palivo. Za dřevní odpad jsou považovány volně ležící větve a zbytky stromů po těžbě dřeva. Ten je opět použitelný jako palivo nebo se může zpracovat na další typy (štěpka, pelety). Zbytky z dřevozpracujícího průmyslu lze využít na výrobu pelet či briket. [27]

2) záměrně pěstovaná biomasa:

Relativně novým zdrojem k energetickému a průmyslovému využití jsou porosty speciálních plodin, jejichž hlavní výhodou je vysoká produkce biomasy. Jedná se o rychle rostoucí rostliny jako jsou dřeviny (topol, vrba) a byliny (řepka, obilniny, len atd.) s vysokým nárůstem výnosu. Určité formy biomasy, zejména organického původu a nedřevnatých rostlin, jsou vhodné k výrobě bioplynů a nebo jiných biopaliv. [27]

2.1.2 Vznik nápeku v kotlích

Tvorba nápeku je způsobena převážně ze stébelnin (ve tvarech briket, pelet nebo balíků). Sláma jako taková má více druhu forem paliva od volně vložené, řezané označující se nepatrnou měrnou hmotností a nízkou energetickou hustotou, přes balíky až po brikety s peletami. V rámci nízkému eutektickému bodu slámy způsobuje podstatně rychlejší zplyňování, na rozdíl od jiných biopaliv.

2.1.3 Problematické chování biomasového popela ve výtopnách

V nedávné minulosti bylo cílem eliminovat problematické chování biomasového popela související s jeho nízkou eutektickou teplotou (teplotou tání). Tato může být u směsi nižší než u jejích jednotlivých složek. Nízká hodnota eutektické teploty způsobovala tvorbu skelných nálepů na povrchu žárobetonových vyzdívek dna plamence kotlového výměníku tepla. Nálep je tvořen z částecek biomasového popela spalinami uneseného do prostoru plamence a jeho vznik je dán vysokou teplotou spalin v této kotlové zóně. Teplota zde může dosahovat až 1100°C.

Nalepování skla v prostoru dna plamence kotlového výměníku tepla komplikovalo čištění, jelikož k odstranění skla z povrchu žárobetonových vyzdívek bylo používáno mechanické nářadí a tím docházelo též k odlupování povrchových částí žárobetonů v tloušťce cca 5mm. To by vedlo k postupnému ztenčování těchto vyzdívek, jejich následné výměně, a tím by se zároveň i značně prodražil provoz výtopny.

Nejvýrazněji se tento problém projevuje u kotlů spalujících především rostlinnou biomasu. Složení biomasového popela způsobovalo též spékání některých druhů obilné slámy přímo v hořáku kotle. [1]

I když je v současné době tato problematika eliminována, tak stále se naleznou výtopny, které vyprodukují skelný nápek. V konkrétním případě se jedná o materiál získaný z teplárny ve Velkém Karlově, který bude dále pojednán v následujících kapitolách. Ve zmíněné teplárně je jako hlavní zdroj použita řepková sláma. Spotřeba této slámy činí až 2,5 tuny (6 balíku) na jeden měsíc.

2.1.4 Princip přívodu slámy do kotle

Sláma se do kotle přivádí pomocí pásového dopravníku k sečnému zařízení, kde se sláma přeseká na menší části a dále je vzduchovým tlakem přenesena do kotle. Množství přenesené slámy reguluje dávkovač. V našem případě není ke spalování slámy zapotřebí speciální zapalování plyny nebo jinými pomocnými látkami.



Obr.1: Pásový dopravník



Obr.2: Rozsekání slámy v mechanickém zařízení



Obr.3: Přívod slámy do kotle



Obr.4: Spalování slámy

2.1.5 Problematika skelný nápek

V minulosti při spalování slámy v kotlích docházelo k velkému nárůstu skelného nápeku, který poškozoval kotle, a bylo velmi obtížné ho odstranit. Jedno z řešení bylo vytvořit násyp na dně kotle, který měl sloužit jako separační vrstva (oddělit skelný nápek od žárobetonu) pro snadné odstranění. Jako materiál byl převážně použit písek nebo vápno + kaolín.

Jedná se o materiál, který vzniká spékáním roztavené slámy přibližně při 800°C a zůstává na dně kotle. V dnešní době je výskyt skelného nápeku eliminován, avšak stále jsou výtopny, ve kterých tato hmota vzniká. Pro tento materiál zatím není vhodné využití. Jediné jeho alternativní řešení je, že se uloží na skládky nebo se rozdrtí a vyveze na pole.[2]

2.1.6 Charakteristická struktura skelného nápeku

Nelze přesně určit, jakými vlastnostmi bude materiál disponovat, jelikož jsou závislé na různých faktorech, které vytváření nápeku ovlivňují. Mezi ně patří především teplota

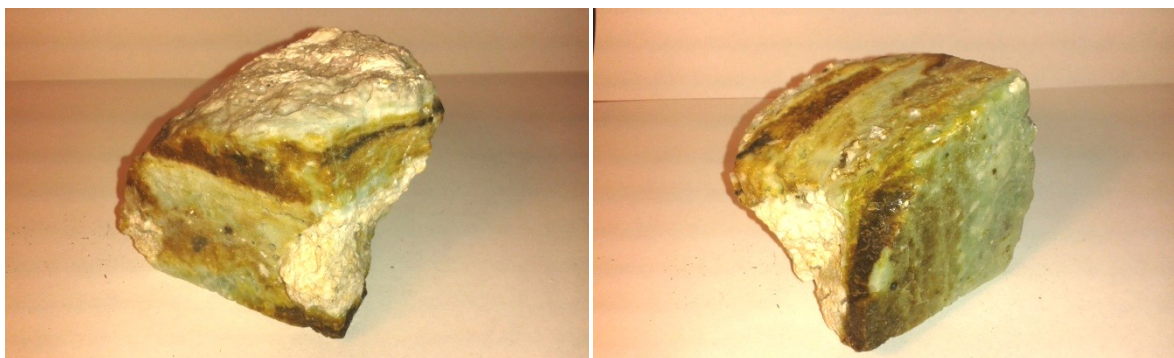
spalování, druh paliva, druh hnojiva, časová výdrž v kotli. Tyto faktory nám ovlivňují pevnost, pórovitost, barevnost, obsah minerálů a jiné vlastnosti nápeku.



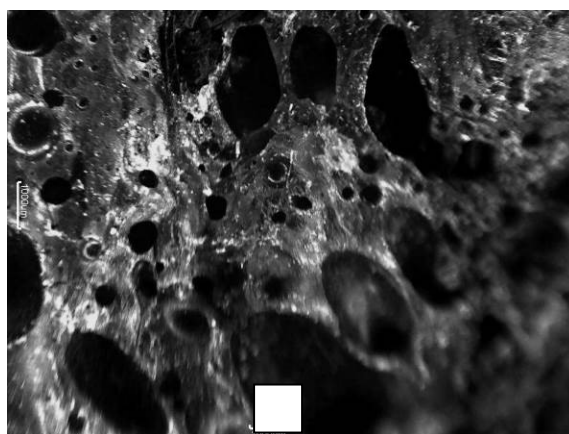
Obr.5: Různé zbarvení a struktura skelného nápeku



Obr.6: Různé zbarvení skelného nápeku



Obr.7: Skelný nápek z biomasy ve Žluticích



Obr.8: Porézní struktura strusky z teplárny z Velkého Karlova, bílý čtverec je 1 mm².

2.2 Odpady využívané ve stavebnictví

V současné době je v hospodářsky vyspělých zemích trendem snaha o co nejefektivnější využití maximálního množství odpadů jako druhotné suroviny, které je preferováno před jejich ukládáním na skládky. Využitím odpadních surovin se zvyšuje průmyslová výroba a úspora energií ve srovnání s použitím prvotních zdrojů. Největší uplatnění je ve stavebnictví. [5]

Máme mnoho odpadních surovin využívaných ve stavebnictví, jako je popílek, struska, energosádrovec, microsilica a další látky. Tyto materiály vznikají v různých průmyslových odvětvích a díky svým vlastnostem přispívají ke zlepšení fyzikálních a mechanických vlastností betonu, kde jsou použity jako příměsi, nebo mohou částečně nahradit dávku cementu, aniž by ovlivnili konečné výsledky pevností betonu. [3]

2.2.1 Popílek

Popílek vzniká při spalování uhlí a jedná se o velmi jemně zrnité kulovité sklovité částice (cca 0,09mm), které se z velké části skládají z SiO_2 a Al_2O_3 . Tento odpad obsahuje nejméně 25% SiO_2 , který zajišťuje pucolánovou aktivu (schopnost reakce amorfního SiO_2 s $\text{Ca}(\text{OH})_2$, kde nám určují pojivové vlastnosti).

Popílek zařazujeme hlavně do příměsí druhu II, které mají pucolánové vlastnosti nebo latentní hydraulicitu. Také se může používat jako příměs druhu I, kde působí jako inertní materiál v procesu hydratace cementového tmele.

Díky jemně zrnitým částicím kulovitěho tvaru zlepšuje popílek fyzikální a mechanické vlastnosti betonu. Čím menší jsou částice, tím je vyšší pevnost. Ovlivňuje také čerpatelnost čerstvého betonu, zpracovatelnost, soudržnost a zmenšuje náchylnost na rozmísení čerstvého betonu při přepravě a zpracování. Popílkem můžeme nahradit částečnou dávku cementu, aniž by byla ovlivněna konečná pevnost. [3]

Rozdělení popílku:

Ve světě je popílek klasifikován dle ASTM C618 do dvou tříd, a to C nebo F. Třída F označuje výrobu převážně z černého uhlí nebo antracitu a třída C z hnědého uhlí nebo lignitu.

Chemické složení popílku typu F:

$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$ pro třídu F

$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 50\%$ pro třídu C

Černouhelné popílký jsou obvykle spalovány při vyšších teplotách a mývají skelnou strukturu zrn oproti hnědouhelným. Často se stává, že popílký z hnědého uhlí splňují chemické požadavky i pro třídu F.

Popílký dělíme dle druhu technologie výroby a to z klasického spalování a z fluidního spalování. [28]

U popílků vzniklých spalováním klasickým způsobem se teplota spalování pohybuje okolo 1400 - 1600°C. Obsahují především sklovitou fází (obvykle nad 50%), která hraje

důležitou roli v reaktivitě popílků s Ca(OH)_2 za vzniku C-S-H gelu. Také obsahují mullit, jehož se reakce zúčastňuje pouze za hydrotermálních podmínek a β -křemen.

Z ekologických důvodů začaly teplárny a elektrárny používat technologii fluidního spalování za atmosférického tlaku. Výchozí princip fluidního spalování závisí na namletém palivu s přísadou vápence nebo dolomitu, které se spaluje převážně v cirkulující vrstvě při teplotách kolem 850 °C. Tato teplota je optimální pro absorpci oxidu siřičitého aktivním CaO. Oproti klasickému odsiřování, které čistí spaliny až po spalovacím procesu, se použitím fluidní technologie umožňuje likvidace škodlivin přímo uvnitř kotle. Výhoda této technologie spočívá v tom, že během disociačního procesu se váže uvolněný SO_2 na CaSO_4 . Pokud by nedošlo k navázání SO_2 , v ovzduší by vznikaly škodlivé kyselé deště. [28]

Produkt ve formě ložového popela nebo popílku z odlučovačů je pevný odpad vzniklý této technologie a výstupem je produkt jakoby směs popela z původního paliva, nezreagovaného CaO, síranu vápenatého a ostatních částí z reakce popelovin s CaO a nespáleného paliva. Popílků se vykazují vysokým obsahem SO_3 (7-18%). K jejich pojivovým vlastnostem převážně přispívá vyskytující se anhydrit (20%) a volné vápno (15%). Vlivem nižší teploty spalování má nezreagovaný CaO podobu měkce páleného vápna, a tím pádem je reaktivní. Typický je také velmi nízký obsah taveniny. Jedná se o nejmodernější technologii spalování uhlí a dalších druhů paliv, která je považována za nejúčinnější metodu vedoucí ke snižování emisí škodlivých látek do ovzduší. [28]

2.2.2 Vysokopecní struska

Další odpadní surovinou je struska. Jedná se o produkt, který je získáván při tavení železné rudy ve vysoké peci. Vysokopecní struska vzniká z přidaných přísad ve vysoké peci. Nalezneme ji na hladině roztaveného železa, kde tvoří ochrannou bariéru před zpětnou oxidací železa. Po vypuštění železa vysokopecní struska začne chladnout a dále se může zpracovat jako hutné těžké kamenivo a nebo jako granulovaná struska. [3]

Ve stavebnictví se struska používá jako příměs druhu II. Díky svým latentně hydraulickým vlastnostem se přidává do cementu. Běžně se vyrábí cement s vysokým podílem vysokopecní strusky tzv. CEM III (vysokopecní cement). Svými vlastnostmi pak přispívá k vyšším pevnostem betonu a jeho celistvosti. [4]

Samotnou strusku rozdělujeme na vysokopecní, ocelářenskou, slévářenskou a vulkanickou. V současnosti struska z metalurgie neželezných kovů vykazuje problematiku, kterou nám zobrazuje databáze analyzovaných výsledků a různých testů mnoha typů strusek.



Obr. 9: Vysokopecní struska Ostrava Kunčice (Zdroj: [://www.cactusmineral.wbs.cz](http://www.cactusmineral.wbs.cz))



Obr. 10: Slévářenská struska Frýdlant n. O. Slévárna Ostravice (Zdroj: [://www.cactusmineral.wbs.cz](http://www.cactusmineral.wbs.cz))



Obr. 11: Ocelárenská struska (Zdroj: [://www.cactusmineral.wbs.cz](http://www.cactusmineral.wbs.cz))

2.2.3 Energosádrovec

Energosádrovec vzniká v elektrárnách jako vedlejší produkt odsíření spalin metodou mokré vápencové vypírky. Využívá se jako náhrada přírodního sádrovce, jelikož jeho hlavní složkou je dihydrát síranu vápenatého ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

Jedná se o velmi čistý materiál (čistota až 97-98%) na rozdíl od vytěženého sádrovce, jehož čistota se pohybuje maximálně kolem 70-75%. Energosádrovec je hojně využíván ve stavebním průmyslu. Využívá se pro výrobu cementu, sádrové omítky, pórobetonu, sádrokartonových a sádrovláknitých desek. [6]

2.2.4 Křemičitý úlet

Křemičitý úlet, jinak také nazývaný jako microsilica, je velmi jemnozrnná anorganická amorfni minerální příměs. Jedná se o odpadní surovinu vznikající z hutnické výroby.

Ve stavebnictví se používá jako příměs druhu II při výrobě vysocejakostních betonů. Obsahuje přes 98 % amorfniho SiO_2 , který se vyskytuje ve tvaru kulovitých zrn menších než 0,001 mm. Zároveň se vyznačuje poměrně vysokým měrným povrchem a velmi dobrými pucolánovými vlastnostmi. Díky svým jemnozrnným kulovitým částicím přispívá k zamezení

pórovité struktury betonu. Je odolný vůči chemikáliím, vodě a agresivním činitelům vnějšího prostředí. [3]

Přispívá k vysoké pevnosti betonu, zvyšuje trvanlivost a snižuje rychlost karbonatace povrchových vrstev betonu. Má také schopnost omezit alkalický rozpad kameniva (chemická reakce, která vzniká v betonu, jsou-li v něm najednou přítomny tyto tři složky: alkálie, voda, amorfni křemík.) [4]

Nejčastěji se používá pro výrobu vysokopevnostních betonů a stříkaných betonů. Microsilica se také liší zbarvením. To je dáno obsahem SiO_2 . Čím větší množství, tím tmavší křemičitý úlet.



Obr. 12: Barevnost microsiliky (Zdroj: www.remei.cz)

2.3 Cement

Cement je jemně mletá anorganická látka a tvoří jednu ze tří hlavních složek betonu. Plní zde funkci pojiva. Při smíchání s vodou vzniká cementový tmel, který v důsledku chemické hydraulické reakce začne postupně tvrdnout a tuhnout v cementový kámen. Tento jev může probíhat v suchém i mokřém stavu. Cement si zachovává svou pevnost a stálost v suchém prostředí, ale také v dlouhodobě vystavené vodě.

2.3.1 Historie cementu

Zmínka o cementu sahá až do starověkého Říma. Výraz cement pochází z latinského slova “caedere” (v překladu „tlouci“). Staří Římané tento výraz používali i pro lomový kámen.

Název “cement” vznikl náhodou, když v roce 1774 francouzský překladatel Antoine-Joseph Lorient přeložil dílo *Naturalis historia* od Gaia Plinia Secunda a pro výraz “caementa” použil slovo “ciment”. Z tohoto chybného překladu se stal ciment základním pojmem pro odbornou literaturu. Jedná se o výraz používaný pro maltoviny tvrdnoucí pod vodou v pevnou hmotu.

Staří Římané používali do směsi s vápnem sopečný popel vyskytující se v Itálii u města Pozzuoli na úbočí Vesuvu. Odtud pocházejí materiály podobného složení s názvem “puclán” (Pucolán nebo-li pucolánový popel je v podstatě jemný písečný sopečný popel). Charakteristickými vlastnostmi pucolánu, které určují i vlastnosti pojivové, jsou hydraulická a schopnost reagovat s Ca(OH)_2 . [7] [8]



Obr. 13: Pantheon v Římě (150 n.l.) -betonová kupole (Zdroj: commons.wikimedia.org)

Za počátek moderní výroby cementu se považuje první polovina 19. století, kdy byl v roce 1824 udělen anglický patent č. 5022 Josefu Aspdinovi na výrobu maltoviny, kterou nazval portlandským cementem.

Název portlandský cement je odvozen od názvu těžebního lomu v blízkosti města Portland v jižní Anglii. Výchozí produkty byly podobně zbarvené jako stavební kámen a svrchnojurský vápenec. [9].

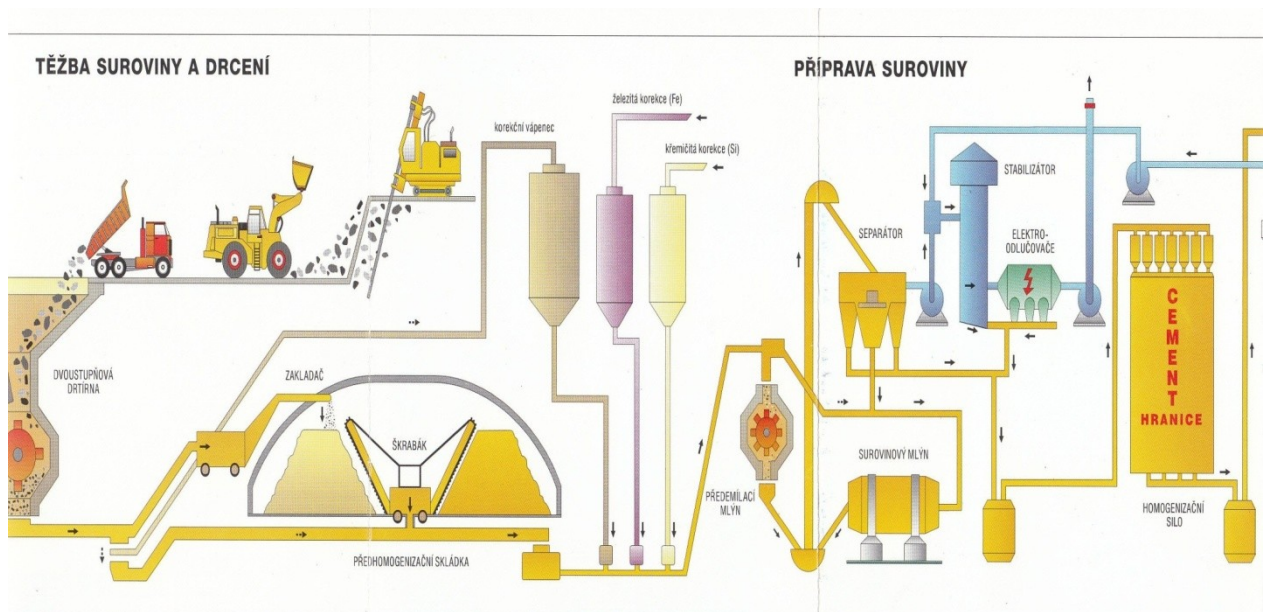
První zmínka o výrobě portlandského cementu v Čechách spadá do druhé poloviny 19. století. Pokus provedl Ferdinand Bárta v roce 1860 v Hlubočepích. Jako první v Čechách je evidována cementárna v Bohosudově založená roku 1865. Tímto začala éra výstavby cementáren v okolí Prahy v 70. letech 19. století. Další cementárna byla založena v roce 1870 v Podolí, v roce 1872 v Radotíně a v roce 1900 v Berouně.

2.3.2 Výroba cementu

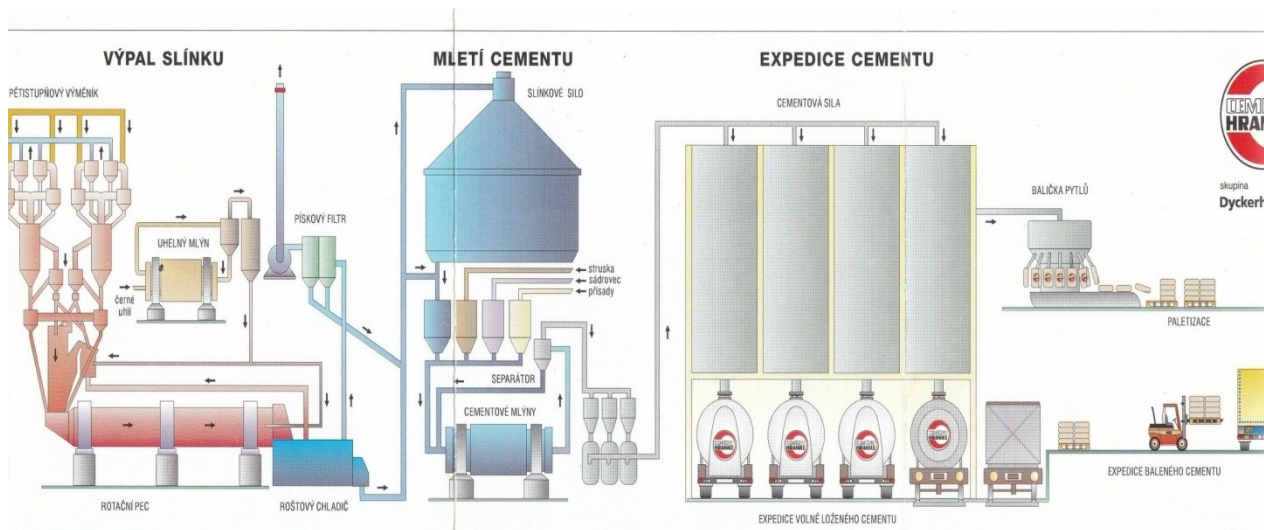
Cement se vyrábí v cementárně společným vypalováním vápence a jílu (někdy je použita i samotná hornina, ale ta musí obsahovat jednotlivé složky ve vhodném poměru) při teplotách okolo 1450 °C. Vyrobený slínek se pak rozemílá, někdy i s příměsemi (vysokopecní struskou, trasem, popílkem). Vzniklý šedivý prášek - cement - smíchaný s vodou vytváří pojivovou (hydraulickou) složku betonu. [10]

Postup výroby cementu:

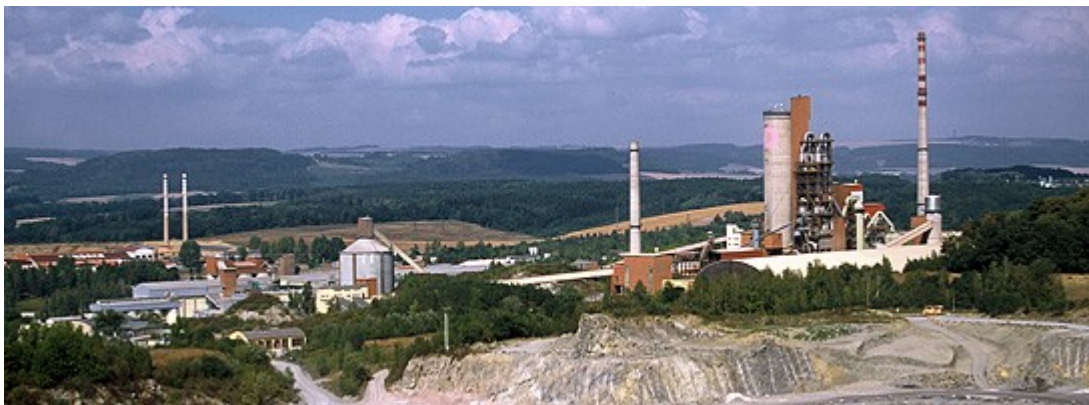
- 1) příprava surovinové směsi – těžba vápence a korekčních surovin,
jejich drcení, mletí a homogenizace
- 2) výroba slínku – tepelné zpracování (výpal) surovinové směsi na
slínek, probíhající obvykle v rotační cementářské peci a následné
chlazení a odležení vypáleného slínku
- 3) výroba cementu – mletí slínku s příměsemi (upravují vlastnosti
výsledného produktu) nebo přísadami a následné skladování
cementu v zásobnících a baleních a expedice cementu [24]



Obr. 14: schéma výroby cementu, Těžba suroviny a příprava (Přednáška: Technologie stavebních dílců I)



Obr. 15: Schéma výroby cementu -Výpal slínku, mletí cementu, expedice cementu (Zdroj: Přednáška: Technologie stavebních dílců I)



Obr. 16: Cementárna Hranice na Moravě s přilehlým lomem. (Zdroj: www.cement.cz)

Těžba a úprava suroviny

Nejprve se musí vytěžit základní surovina, tedy vápenec. Existuje několik způsobů jak dobýt tuto surovinu. V podstatě se jedná o tři metody - mechanickou, pomocí trhacích prací a nemechanickou. Nejvyužívanější metodou je nemechanické odkrývání hornin pomocí Cevamitu. Při ní se používají expanzní cementy (práškové výbušné směsi), které při smíchání s vodou explodují. Výhodou je, že se nemusí podávat žádost o schválení procesu. Neprojevují se totiž žádné vedlejší účinky jako je tlaková vlna, seismický a akustický efekt či rozlet. Tato metoda se hojně využívá v chráněných oblastech.



Obr. 17: Použití cevamitu k oddělení horniny (Zdroj: desap.cz)

Dále se vápenec upravuje drcením na menší části. Drcení cementu může probíhat způsobem jednostupňovým nebo dvoustupňovým. V druhém případě se nejprve rozdrťí nahrubo a pak

následuje ještě jeho rozbití na menší zrna. Surovinové drti se uskladňují v zásobnících nebo na předhomogenizačních skládkách. [24]



Obr. 18 : Před homogenizační skládka (Hranice na Moravě, Cement Hranice), (Zdroj: Přednášky: Silikátové technologie)

Příprava suroviny

Během procesu mletí je surovina podrcena a primárně homogenizována na jemně mletou moučku. Jemnost vstupní suroviny má velký význam při procesu slinování a rychlosti vzniku slínku při výpalu. [24]



Obr. 19: Rotační mlýn Českomoravský cement, závod Mokrá (Zdroj: Přednášky: Silikátové technologie)

Výpal slínku

Nejdůležitějším technologickým procesem je výpal slínku při výrobě cementu. Vznik slínku spočívá ve vypalovacím procesu.

Při překročení slinovací teploty rozžhavené minerální násady. Dochází při teplotách 1300-1400 °C ve slinovaném materiálu k výrazným chemickým změnám, které se přeměňují v tricalciumsilikát (alit), důsledkem je pak nejvýznamnější hydraulicky aktivní minerál. Slínek vzniká postupným spékáním práškové násady a nabalováním rozžhavených částic procházejících zvolna v rotující peci.

Slínek je hlavní surovinou pro výrobu cementů. Je velmi podobný přírodním minerálům. Jeho chemická struktura se skládá převážně z křemičitanu vápenatého a hlinitanu vápenatého.

Slínek se nechá z části vychladnout a dále je přenesen do skladovacích slínkových sil, kde se ponechá do úplného vychladnutí. [24] [3]



Obr. 20: Rotační pec pro suchý způsob výroby cementu (Českomoravský cement, závod Mokrá), (Zdroj: Přednášky: Silikátové technologie)

Mletí cementu

Vytvořený a uskladněný slínek je dopravován do kulových cementových mlýnů spolu s regulátorem tuhnutí (síranem vápenatým) a rozemlet na velmi jemnozrnnou moučku (portlandský cement). Při procesu mletí mohou být do mlýnice dopraveny i další látky jako je vysokopecní granulovaná struska, popílek, vápenec. Konkrétní typ dopravovaných látek závisí na požadovaném druhu cementu. [25]



Obr. 21: Kulový mlýn (Zdroj: Přednáška: Technologie stavebních dílců I)

Nakládka a doprava cementů

V závislosti na druhu a rozdílné pevnostní třídě se cement uskládá v oddělených cementových silech. Způsob zpracování záleží na objednateli. Ve velkých obchodních řetězcích se cement dodává v pytlích po 25 kg, které se vytváří na rotačních baličkách papírových pytlů. Tyto pytle jsou uskladněny na palety pomocí automatické paletizační linky. Celá paleta s cementem může být kompletně zabalena do ochranné fólie. Následně může být cement naložen na nákladní železniční vagóny (Obr. 22) nebo na nákladní automobily a expedován k zákazníkovi. Cement nemusí být jen v balené formě, ale může být dopravován jako volně vložený do autocisteren (Obr.23) nebo železničních vozů.



Obr. 22: Doprava železničními vagóny, volně vložený cement (Zdroj: Přednáška: Technologie stavebních dílců I)



Obr. 23: Doprava nákladními automobily, volně vložený cement (Zdroj: Přednáška: Technologie stavebních dílců I)

2.3.3 Druhy cementu

V současné době je cement vyráběn podle ČSN EN 197-1 (72 2101) Cement-Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití.

Máme 5 základních druhů cementu:

- CEM I Portlandský cement
- CEM II Portlandský cement směsný
- CEM III Vysokopecní cement
- CEM IV Pucolánový cement
- CEM V Směsný cement

Tab.1: - Tabulka druhů cementů dle ČSN EN 197-1

ČSN EN 197-1; tabulka 1 - 27 výrobků skupiny cementů pro obecné použití

Hlavní druhy	Označení 27 výrobků (druhy cementů pro obecné použití)		Složení (poměry složek podle hmotnosti) ^{a)}										Doplňující složky	
			Hlavní složky											
			Slínek	Vysokopecní struska	Křemičitý úlet	Pucolány		Popílky		Kalcinovaná břidlice	Vápenec			
						přírodní	přírodní kalcinované	křemičité	vápenaté	T	L	LL		
			K	S	D ^{b)}	P	Q	V	W					
CEM I	Portlandský cement	CEM I	95-100										0-5	
	Portlandský struskový cement	CEM II/A-S	80-94	6-20									0-5	
		CEM II/B-S	65-79	21-35									0-5	
CEM II	Portlandský cement s křemičitým úletem	CEM II/A-D	90-94		6-10								0-5	
	Portlandský pucolánový cement	CEM II/A-P	80-94			6-20							0-5	
		CEM II/B-P	65-79			21-35							0-5	
		CEM II/A-Q	80-94				6-20						0-5	
		CEM II/B-Q	65-79				21-35						0-5	
	Portlandský popilkový cement	CEM II/A-V	80-94					6-20					0-5	
		CEM II/B-V	65-79					21-35					0-5	
		CEM II/A-W	80-94						6-20				0-5	
		CEM II/B-W	65-79						21-35				0-5	
	Portlandský cement s kalcinovanou břidlicí	CEM II/A-T	80-94							6-20			0-5	
		CEM II/B-T	65-79							21-35			0-5	
	Portlandský cement s vápencem	CEM II/A-L	80-94								6-20		0-5	
		CEM II/B-L	65-79								21-35		0-5	
		CEM II/A-LL	80-94									6-20	0-5	
		CEM II/B-LL	65-79									21-35	0-5	
	Portlandský směsný cement ^{c)}	CEM II/A-M	80-94					6-20					0-5	
		CEM II/B-M	65-79					21-35					0-5	
	CEM III	Vysokopecní cement	CEM III/A	35-64	35-65									0-5
			CEM III/B	20-34	66-80									0-5
CEM III/C			5-19	81-95									0-5	
CEM IV	Pucolánový cement ^{d)}	CEM IV/A	65-89				11-35						0-5	
		CEM IV/B	45-64				36-55						0-5	
CEM V	Směsný cement ^{d)}	CEM V/A	40-64	18-30			18-30						0-5	
		CEM V/B	20-38	31-50			31-50						0-5	

a) Hodnoty v tabulce se vztahují k součtu hlavních a doplňujících složek.

b) Obsah křemičitého úletu je omezen do 10 %.

c) Hlavní složky v portlandském směsném cementu CEM II/A-M a CEM II/B-M, v pucolánovém cementu CEM IV/A a CEM IV/B a ve směsném cementu CEM V/A a CEM V/B mimo slínku musí být deklarovány v označení cementu.

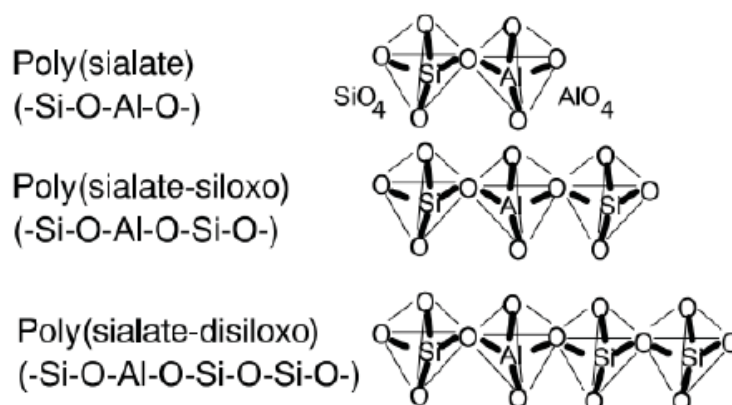
2.4 Alkalicky aktivované systémy (AAS)

AAS jsou v praxi často označovány jako geopolymery, ale ve skutečnosti se jedná jen o jednu část z alkalicky aktivovaných systémů.

AAS se používají pro všechny anorganické polymerní látky, které jsou připravovány z aluminosilikátových látek (jako jsou popílky, struska, pucolány, metakaolin a jiné latentně hydraulické látky). Vznikají geopolymery v zásaditém prostředí za normální teploty a v tlaku. Tyto látky svoji hydraulicitu projeví až po přidání vhodného aktivátoru a potřebného množství vody.

Při geopolymeryzaci vznikají polymerní vazby Si-O-Al-O. [11] [12]

Geopolymery mají pozitivní vliv na ekonomickou, energetickou a ekologickou náročnost. Uplatňují se především jako náhrada cementových pojiv. Mohou se využívat k záchraně památek v architektuře. Díky své nehořlavosti je také lze aplikovat v interiérech moderních letadel, tepelných štítech raketoplánů anebo se z nich vyrábí kabinky do vozidel formule 1.

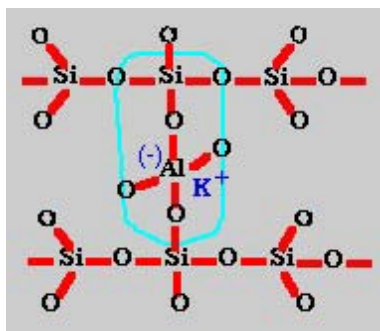


Obr. 24: Molekulární síť Josepha Davidovits (Zdroj: old.vscht.cz)

Pojem geopolymery jako první definoval Joseph Davidovits v roce 1976 - 1979: „Geopolymer je látka, která vzniká anorganickou polykondenzací tzv. geopolymeryzací.“ [13]

Při ní vzniká trojrozměrná aluminosilikátová síť empirického vzorce.

$\text{Na, Kn} (-\text{Si-O})_2\text{-Al-O})_n \cdot w\text{H}_2\text{O}$, kde n je stupeň polykondenzace, w je rovno 1, 2, 3 nebo více než 3. [12]



Obr.25: Trojrozměrná aluminosilikátová síť empirického vzorce (Zdroj: old.vscht.cz)

Musí se brát ohledy na působení alkálií Na a K, které způsobují negativní a pozitivní aspekty.

- Mezi negativní aspekty se zařazují:
- Poruchy při výrobě cementu
 - Vytváření nežádoucích fází $KC_{12}S_{23}$, NC_8A_3
 - „Alkali-silica“ reakce v betonu
- Mezi pozitivní aspekty se zařazují:
- Urychlení hydratace
 - Vytváření nových hydratačních fází

Rozdíl mezi portlandským cementem a geopolymery je v tom, že výroba portlandského cementu je energeticky a časově náročnější.

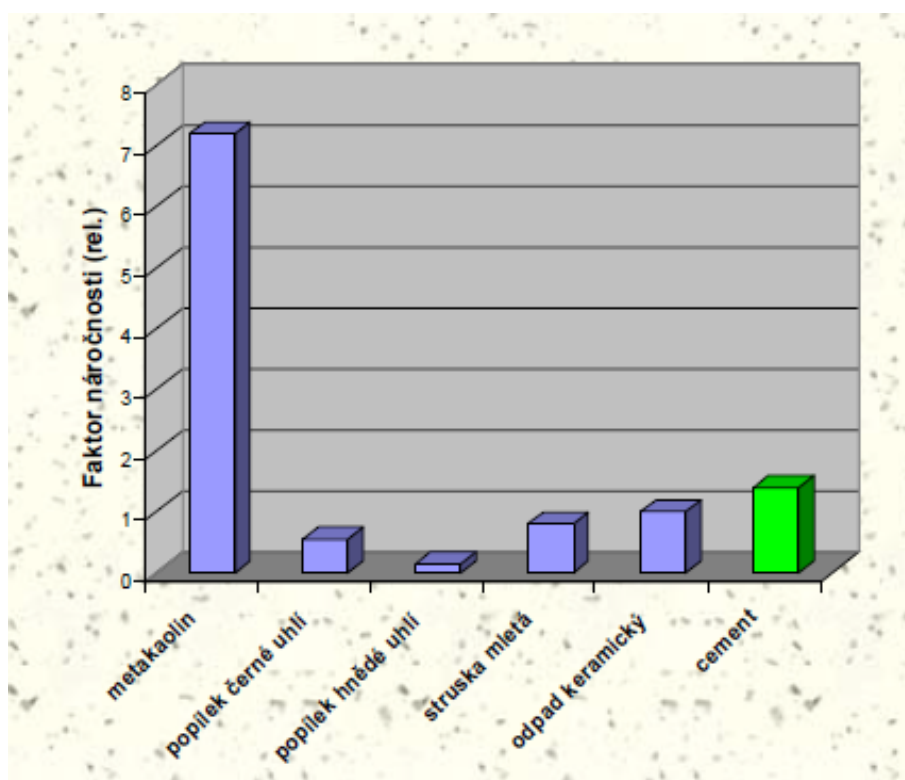
Geopolymery jsou na rozdíl od cementu šetrnější k životnímu prostředí. Při jejich vzniku se do ovzduší neuvolňuje žádný oxid uhličitý (CO_2). A jako hlavní suroviny mohou být využívány velkoobjemové odpadní průmyslové materiály, například vysokopecní strusky nebo elektrárenské popílků. Použitím těchto odpadních surovin se šetří zásoby primárních nerostných surovin. Další výhodou AAS je, že odstraňují energeticky náročný výpal vápence, který je potřebný pro výrobu portlandského slínku. [14]

Dalším rozdílem mezi cementem a geopolymery je průběh hydratace AAS. Hydratací portlandského slínku se odrážejí také vlastnosti produktů v konečné fázi.

Při hydrataci portlandského cementu s vodou vznikají C-S-H gely a $Ca(OH)_2$. Ve velké míře vznikají při alkalické aktivaci granulovaných vysokopecních strusek gely a v malé míře také zeolitické fáze. Naopak materiály připravené na bázi metakaolínů a popílků obsahují především zeolitické fáze typu $(Na,Kn\{-(Si-O)_z-Al-O\}_n \cdot nH_2O)$.

Podstatný rozdíl ve výsledku hydratačních procesů je v tom, že AAS neobsahuje portlandit, který v hydratovaném portlandském cementu představuje nejslabší článek kompozitního systému. Vlivem proměnlivosti ve složení použitých surovin vzniká ve vytvořené geopolymerní směsi několik různých typů výsledných produktů.

Nejvhodnějším materiálem pro geopolymery je popílek, dále následuje struska, keramický odpad a cementy. Nejméně vhodnou základní surovinou je metakaolin.



Graf. 1: Systémová analýza surovin (jsou brány v potaz ekonomická, energetická, ekologická hlediska)

2.4.1 Historie geopolymérů

O počátku geopolymérů se dlouhá léta vedou spory. Podle chemika Josepha Davidovitse se geopolymer používal už ve starověku a to zejména v dávném Egyptě, kde stavební dílce byli postaveny z tohoto materiálu. Nejznámější starověkou stavbou, při jejíž výstavbě byl použit kopolymer, jsou pravděpodobně pyramidy v Gíze. Zřejmě mohlo jít o poměrně hojně používaný stavební materiál. [15]



Obr. 26: Pyramidy v Gíze (Zdroj: egypt.vdetailech.cz)

Dále se spekuluje o tom, že mohl být použit na výstavbu zikkuratů v Mezopotámii, dalších staveb vyspělých civilizací ve Střední a Jižní Americe a o několik desítek staletí později se o něm uvažuje v souvislosti se stavbami starověkého Říma. Na základě informací o vyspělosti tehdejších civilizací, jejich ekonomické situaci, zeměpisné poloze a dle výsledků chemických analýz dochovaných staveb lze usoudit, že tehdejší lidstvo dokázalo tyto materiály vyrobit. [14]

Nejstarší zmínky o zahájení výzkumu AAS pocházejí už z první poloviny 20. století. Jedním z prvních zaznamenaných použití alkalicky aktivovaných materiálů v průmyslu byla aplikace směsi na bázi kaolínu a uhličitanu sodného při teplotě 150 °C v keramických závodech Olsen v roce 1934. [14]

V padesátých letech minulého století se na Ukrajině zabýval výzkumem alkalicky aktivovaných strusek profesor Gluchovskij, který se pak v průběhu 60. a 70. let významně podílel na identifikaci produktů solidifikace. V rámci výzkumu zjistil, že složky spolu reagují za vzniku zeolitů. Betony vytvořené na bázi alkalické aktivace strusky touto technologií označil názvem „gruntocementy“ a popsal je v knize „Gruntosilikáty“ vydané v roce 1959. V roce 1969 získal na přípravu těchto materiálů první patent. [16]



Obr. 27: Stavba z „gruntosilikátových“ bloků asi 1958 (Zdroj: old.vscht.cz)

Za zakladatele označení geopolymery se považuje vědec a chemik Joseph Davidovits, který v roce 1972 spolu s dalšími vědci připravil směs pro výrobu voděodolných keramických obkladů, které mohly být vyrobeny při teplotách nižších než 450 °C a nemusely být vypalovány.

V 70. letech týmy Davidovits a Legrand rozvinuly technologie založené na geosyntéze. Joseph Davidovits použil poprvé v roce 1978 pro alkalicky aktivované materiály na bázi kaolínu výraz geopolymery. Ačkoli v Davidovitsově definici geopolymery vyhovuje pouze systém, v němž je jako pojivo použit čistý metakaolín, tímto zjednodušeným výrazem jsou v současné době obvykle označovány všechny alkalicky aktivované materiály, aniž by se bral ohled na použité materiály.

2.4.2 Aktivátor

Aktivátorem jsou označovány alkalické sloučeniny, které způsobují a významně ovlivňují proces tuhnutí a tvrdnutí připravovaných čerstvých směsí. V největší míře se jako aktivátory používají roztoky hydroxidů (sodných či draselných), křemičitan sodný (vodní sklo) a méně pak hlinitany či křemičitany. [17]

Silikátový modul MS, jenž je dán poměrem $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$, je důležitým parametrem aktivátorů alkalických směsí. Jeho vliv byl například prokázán při aktivaci elektrárenského popílku, kde se zjistilo, že s klesající hodnotou MS roztoku aktivátoru roste pevnost výsledných výrobků. Při překročení určité kritické meze ovšem pevnost klesá. Přidáním NaOH, kterým se upravuje silikátový modul) jsou však vlastnosti nově vzniklého materiálu ovlivněny pozitivně. [19]

Přestože je poměrné zastoupení aktivátoru při míchání čerstvých směsí velice malé, jedná se o nejdražší součást kompozitu a z ekonomického hlediska jde proto o nejnáročnější surovinu. Vzhledem k tomu, že tyto látky mají i nepříznivý vliv na lidské zdraví (jedná se většinou o žíravé, tedy nebezpečné látky), může být ekonomická stránka další příčinou toho, proč se geopolymerní materiály nevyužívají v plné míře. [18]

2.4.3. Vodní sklo

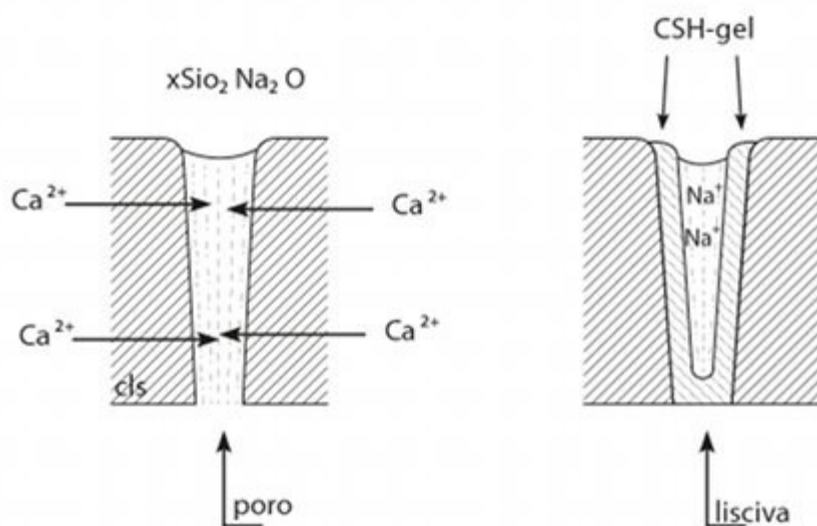
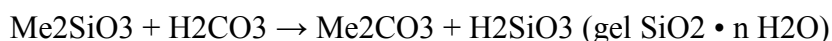
Vodní sklo je chemická látka. Jedná se o křemičitan sodný, který je rozpuštěn ve vodě. Výroba vodního skla se provádí dvěma základními metodami. Jednou z nich je výroba z PKS/D (pevný křemičitan sodný/draselný). PKS/D se vyrábí ze sklářského písku (obsah oxidu křemičitého 70-75%) tavením ve sklářské vanové peci při teplotě 1400 – 1600 °C za pomoci alkalických tavidel – soda (oxid sodný) nebo potaš (oxid draselný), tj. látek, které tavení písku usnadňují. Roztavená sklovina se prudce chladí za účelem rozpraskání na co nejmenší části (vizuálně podobné kouskům ledu), a tím je následné rozpouštění jednodušší. Takto připravený vstupní materiál se pomocí hydroxidu sodného/draselného, vody, teploty a tlaku rozpouští v autoklávu (vytápěná, uzavíratelná tlaková nádoba) na tekuté vodní sklo. Tímto způsobem lze vyrábět všechny typy vodních skel.

Další metodou výroby je hydrotermální reakce. V autoklávu se za pomoci hydroxidu, vody, teploty a tlaku přímo rozpouští křemičitý písek. Touto metodou lze vyrábět jen určité typy sodných vodních skel.

Přidáváním organických či anorganických aditiv do procesu rozpouštění v autoklávu lze vylepšovat parametry a vlastnosti vodních skel.

Složení vodního skla bývá nejčastěji charakterizováno křemičítým modulem M , což je molární poměr $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ pro sodné sklo nebo $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O}$ pro draselné sklo. Hodnota křemičitého modulu běžně vyráběných typů vodního skla leží obvykle v rozmezí 1,6 - 4,1. Vedle modulu se k charakterizaci vodního skla používá nejčastěji jeho hustota, která poskytuje informaci o koncentraci roztoku i o složení výchozího skla, dále viskozita a rovněž hodnota pH. Vodní skla jsou roztoky solí silné zásady a slabé kyseliny a jsou tedy značně alkalické. [20]

Vytvrzování vodního skla je způsobeno tvorbou gelu kyseliny křemičité, nejčastěji v důsledku reakce alkalického křemičitanu s oxidem uhličitým, resp. kyselinou uhličitou, podle následujícího schématu.



Obr. 28: Schéma nasyceného póru s difúzí vápníku z hmoty betonu (vlevo) a následné srážení gelu a zúžení póru po impregnaci (vpravo). (Zdroj: www.izolace-ecobeton.cz)

2.5 Kamenivo

Jedná se o zrnitý materiál anorganického, přírodního nebo umělého původu určený pro stavební účely. Ve stavebnictví se používá kamenivo hlavně jako plnivo, které v kombinaci s vhodnými pojivy slouží pro přípravu malt a betonů.

Základním úkolem kameniva je vyrobit poměrně pevné a tlakově odolné konstrukce, které jsou vytvořeny vzájemným opřením a zaklíněním zrn.

Základní požadavky na kamenivo jsou detailně popsány v příslušných evropských normách. Níže je uveden jejich seznam.

- EN 12620 Kamenivo do betonu
- EN 13043 Kamenivo pro asfaltové směsi a povrchové úpravy silnic, letišť a jiných dopravních ploch
- EN 13055-1 Pórovité kamenivo - Část 2: Pórovité kamenivo pro betony, malty a injektážní malty
- EN 13055-2 Pórovité kamenivo - Část 2: Pórovité kamenivo pro stmelené a nestmelené aplikace
- EN 13139 Kamenivo pro malty
- EN 13242 Kamenivo nestmelené a stmelené hydraulickým pojivem pro inženýrské stavby a silnice
- EN 13383-1 Kámen pro vodní stavby - Část 1: Specifikace
- EN 13450 Kamenivo pro kolejové lože

Každá norma specifikuje jednotlivé vlastnosti kameniva dosaženého úpravou přírodního, umělého či recyklovaného materiálu a směsí těchto kameniv určených pro konkrétní použití.

Konkrétní nároky v těchto evropských normách jsou zakládány na praktických zkušenostech se zavedenými a používanými druhy kameniva. Pokud se má použít kamenivo ze zdrojů, které nejsou známé a není s nimi žádná zkušenost (nebo jen minimální), je potřeba postupovat velmi opatrně. Této opatrnosti je nejvíce zapotřebí při využívání recyklovaného kameniva nebo kameniva z průmyslových odpadů. Takové kamenivo může mít jiné vlastnosti než běžné přírodní, a proto se musí provést všechny příslušné zkoušky, které jsou stanovené v požadavcích evropských norem. Při nich se posuzuje, zda je kamenivo vhodné k použití ve stavebnictví. [3]



Obr. 29 : Kamenný most v Ostrově (okr. Karlovy Vary)

- Druhy kameniva:**
- Přírodní kamenivo
 - Těžené
 - Drcené
 - Umělé kamenivo
 - Recyklované kamenivo



Obr. 30: Přírodní těžené kamenivo (Zdroj: www.ebeton.cz)



Obr. 31: Uměle vytvořené kamenivo (keramzit), (Zdroj: obchod.liapor.cz)



Obr. 32: Recyklované kamenivo (Zdroj: www.betonserver.cz)

2.5.1 Přírodní kamenivo

Jedná se o nejrozšířenější materiál využívaný pro stavební účely a tvořený přírodními horninami. Přírodní kamenivo je anorganického původu a vzniklo působením mechanických procesů.

Nejčastějším způsobem získávání přírodního kameniva je těžba z řek, obvykle také odstřelem z lomů a drcením. Toto kamenivo vzniká přírodním rozpadem horniny. Těžené

kamenivo je původu ledovcového nebo pochází z říčních naplavenin. Charakteristickými znaky přírodního kamene jsou zaoblené tvary zrn a hladký povrch, které jsou způsobeny transportem a obrušováním horniny ve vodním toku. Vytěžené kamenivo se třídí nebo se ještě zmenšuje.

Jak již bylo zmíněno, dalším způsobem získávání kameniva je drcení. Je charakteristické svým nepravidelným tvarem zrn. Po rozdrcení mají zrna ostré hrany a drsný lomový povrch. Drcené kamenivo vzniká umělým drcením větších kusů horniny a jeho následným tříděním.



Obr. 33: Těžba šterkopísku z vody (Zdroj: stavebni-technika.cz)

2.5.2 Umělé kamenivo

Umělé kamenivo je vyráběno v hutnickém nebo energetickém průmyslu. Jedná se o materiál vzniklý zpracováním a úpravou nerostných surovin pomocí tepelné expanze vhodných jíílů a břidlic nebo sbalkováním popílku. Vykazuje se vysokou pórovitostí a nízkou objemovou hmotností v přibližném rozmezí od 500 do 2000 kg/m³. Zrna vzniklá expanzí jíílů a břidlic mají spečený až slinutý, relativně hladký povrch. Zrna vyrobená sbalkováním mají povrch velmi pórovitý.

Tento stavební materiál obvykle slouží jako náhrada přírodního kameniva. Nejčastěji se využívá ve stavebnictví na zasypy plochých střech, jako lehčené plnivo do betonů a malt, ale také jako tepelně izolační a zvukově izolační materiál. Jelikož bývají nehořlavé, využívají se též jako protipožární ochrana objektů. Můžeme se s nimi setkat i v zahradnictví, kde většinou slouží jako materiály dekorační. Široké uplatnění nalézají i v zemědělství, kde se může umělé pórovité kamenivo použít k provzdušnění zeminy, stabilizaci vlhkosti a hnojiv v půdě, ale i ochraně plodin před mrazem.

Mezi umělé kamenivo zařazujeme Liapor (dříve označován jako keramzit). V České republice je to jediný, uměle vytvořený typ kameniva. Je znám hlavně jako dekorační posyp v zahrádkářstvích a květinářstvích. Dále do kategorie uměle vytvořeného kameniva zařazujeme expandovaný perlit, vermikulit a expandit. [3] [4]

2.5.3 Recyklované kamenivo

Kamenivo anorganického původu, které bylo dříve použito jako stavební materiál ve stavebních konstrukcích. Nejčastěji se používá recyklát z rozdrčeného betonu, někdy pak i z rozdrčeného zdiva.

Úprava stavebního a demoličního odpadu je částečnou kompenzací za přírodní kamenivo. Tím se zároveň snižuje dobývání přírodního zdroje. Dalším přínosem je snížení množství stavebního odpadu na skládkách. Výhodou je i jeho dostupnost a cena. [21]

2.5.4 Pórovité kamenivo

Podle Evropské normy ČSN EN 13055-1 se definuje lehké kamenivo jako kamenivo s pórovitou strukturou, sypanou hmotností do 1200 kg.m^{-3} a objemovou hmotností zrna do 2000 kg.m^{-3} .

Na základě svých charakteristických vlastností jsou hlavním plnivem pro skupinu lehkých betonů a malt. Svou pórovitou strukturou přispívají k tepelně izolačním a zvukově izolačním vlastnostem. Podle původu můžeme i pórovité kamenivo rozlišit na dva druhy - přírodní a uměle vytvořené. [3]

Přírodní pórovitá kameniva

Přírodní pórovitá kameniva jsou získávána z lehkých hornin s vhodnými vlastnostmi. Jedná se o horniny vulkanického původu nebo pórovité sedimenty. Na našem území se z těchto lehkých hornin nalézají tufy, tufity, křemelina, spongility, trasy a čedičové lávy. Nevýhodami přírodního pórovitého kameniva jsou nestejněměrné vlastnosti a proměnlivost objemové hmotnosti. Pro další výrobu se zpravidla hornina zpracovává drcením, a tím pádem vznikají další nežádoucí komplikace, jako je například větší výskyt prachových částic obsažených v pórech kameniva. Většina pórovitých hornin bývá velmi nasákavá a nabývá k většímu vzrůstu objemový změn způsobené vlhkostí.

Pórovitá kameniva z průmyslových odpadů

Z průmyslových odpadů se ve stavebnictví využívá škvára, zpěněná struska, popílek, a recyklované cihelné zdivo. Některé průmyslové odpady, zvláště pak energetické, mají pro použití ve stavebnictví velmi výhodné vlastnosti (vyhovují jak chemickým a mineralogickým složením, tak i strukturou). Nevýhodou všech průmyslových odpadů je fakt, že tyto vlastnosti jsou velmi silně proměnlivé a množství obsažených škodlivin kolísavé. To může jejich využití ve stavebnictví zcela znemožnit. [22]

Škvára je zpevněná odpadní surovina vzniklá při spalování hnědého uhlí. U čerstvé škváry jsou velmi nebezpečné neroztavené zbytky, které se při spalování pevných paliv v roštových topeništích nerozložily. Tyto zbytky obsahují také určité množství původního nebo částečně přeměněného výchozího paliva, které je velmi nežádoucí. Množství těchto nežádoucích zbytků je limitováno maximálním obsahem 10%. Výrazně mohou ovlivňovat tuhnutí cementu sloučeninami síry a převážně siřníky. Objemovou proměnlivost škváry mohou způsobovat volné oxidy CaO a MgO, které ovšem delším odležením samovolně vyhasí. Škvára je samozřejmě posuzována i z hlediska výskytu radioaktivních izotopů. [22] [3]

Na našem území jsou škváry jako pórovité kamenivo pro výrobu lehkých betonů používány nejdéle, ale ne všechny škváry jsou k tomu vhodné. Škváry z lignitu nebo z palivových směsí obsahujících lignit se pro velkou objemovou nestálost nesmějí používat vůbec. Technologický postup výroby škvárového betonu se nijak podstatně neliší od postupu výroby prostého betonu. V současné době se beton s použitím škváry ve formě plniva využívá

jako vyrovnávací materiál a výplňové stavivo. Objemová hmotnost škváry se pohybuje v rozmezí 1300 - 1700 kg/m³. Výroba ze škvárového betonu v současnosti nemá velký význam jako v 50. letech 20. století. [22]

Zpěněná struska (Obr. 34) vzniká v hutnickém průmyslu při zpracování železné rudy, a to náhlým zchlazením žhavé tekuté strusky vodou. Jakost zpěněné strusky je velmi proměnlivá, a proto se výroba z tohoto odpadu moc nevyužívá. Zato struska nezpěněná (chlazená vzduchem) se ve stavebním průmyslu používá velmi často jako hutné kamenivo.

Pro použití zpěněné strusky ve stavebnictví musí být tříděny a odstraněny od kovových částí pomocí magnetické separace. [3]



Obr. 34: Zpěněná struska (Zdroj: mujwebt.cz)

Elektrárenské popílký jsou nerostné zplodiny, které se vytvářejí při spalování tuhých paliv spalovaných většinou v jemně mletém stavu. Skládají se převážně z malých kuliček křemičitanového skla, které ve velkém množství odpadá v tepelných elektrárnách. Jedná se tedy o surovinu s pucolánovými vlastnostmi, jejíž využití je vhodné pro přípravu maltovin a příměsí do betonu. Použitím popílků do betonů a malt se zmenšuje mezerovitost a zlepšuje zpracovatelnost. Mají malou objemovou hmotnost – volně sypaná je v rozmezí 550 - 900 kg/m³. [22]

Cihlářská drť může být odpadem z různých cihlových výrobků, ale převážně vzniká drcením cihelné suti. Největší využití měla cihelná drť po 2. sv. válce, kdy prakticky nebylo vyráběno pórovité kamenivo a celkem běžně se daly použít trosky ze zdemolovaných konstrukcí. Později se tímto způsobem zužitkovával průmyslový odpad a zmetky z cihelen.

Nevýhodou cihelné drti je finančně a časově nákladné třídění sutin, při kterém jsou oddělovány další materiály, jako je dřevo apod. V dnešní době jsou k dispozici mobilní drtičky umožňující realizaci drcení suti přímo na místě výroby. [22] [3]

Agloporit je lehké umělé pórovité kamenivo vyráběné spékáním černouhelných, případně antracitických popílků a jiných korekčních přísad. Používá se pro výrobu izolačních a konstrukčních betonů. Z obzvláště pevného agloporitu můžeme vyrobit železobetonové i předpjaté konstrukční prvky. Tento materiál se vykazuje nízkou objemovou hmotností, objemovou a teplotní stálostí, rychlou nasákavostí a poměrně vysokou pevností, což jsou jeho nesporné výhody. [3]



Obr. 35: Agloporit frakce 8/16 (Zdroj: agloporit.cz)



Obr. 36: řez agloporitem (Zdroj: agloporit.cz)

Pórovitá kameniva z přírodních zdrojů

Jedná se o kameniva vyráběná z různých přírodních hornin nebo zemin expandováním v žáru (tj. využitím jejich nadýmání v pyroplastickém stavu). Vznik pórovitého kameniva spočívá ve vypalování organických součástí a odtékání vody s některými látkami. [22]

Keramzit je obecné označení pro lehká plniva do betonu vyráběná výpalem a expandací přírodních jílu.

Liapor je velmi lehký granulát zakulaceného tvaru vyráběný též expandováním přírodního jílu. Ve své podstatě se Liapor zařazuje mezi keramické materiály, které jsou jedním z nejstarších a nejosvědčenějších stavebních materiálů známých již z období 10 000 - 3000 let př. n. l.

Zejména jde o vyšší stupeň zpracování výchozího materiálu, což umožňuje, že k základním vlastnostem keramických materiálů, jako je pevnost, malá nasákavost, stálost a zdravotní nezávadnost, přistupují u Liaporu ještě další, jako např. velmi nízká objemová hmotnost a vynikající tepelně izolační schopnosti.

Charakteristickou strukturou Liaporu je granulovaná forma s téměř kulovitými zrny s vnitřní stejnoměrnou pórovitou strukturou a uzavřeným slinutým povrchem. Tato granulovaná forma umožňuje nejen jeho využití v různých oblastech stavebnictví, ale i v řadě dalších oborů. Nejvíce se Liapor používá ve stavebnictví pro zásypy a tvorbu betonů a malt. [23]

Expandovaný perlit je drobné pórovité kamenivo vyráběné žíháním zrn vulkanického skla obsahujícího vodu. Vzniká expandováním horniny sopečného původu, která utuhla jako sklo, v různých druzích pecí. Jedná se o velmi křehký materiál, který se snadno drtí, je nehořlavý a má vysoký obsah otevřených pórů (až 25%). Z velkého množství výhod lze uvést zdravotní nezávadnost, biologickou a chemickou inertnost, odolnost vůči mrazu a objemovou stálost. Jeho sypná hmotnost se pohybuje v rozmezí 50 - 150 kg/m³. Vyznačuje se velmi nízkým koeficientem tepelné vodivosti, a proto je vhodný hlavně jako tepelně a zvukově izolační materiál. Nevýhodou je vysoká nasákavost, při které může nabít až 400% své hmotnosti díky vysokému počtu otevřených pórů.

Perlit je vlastně amorfni křemičitan hlinitý sopečného původu. Má velmi obdobné chemické složení a vlastnosti jako sklo. Hustota perlitu je 2350 kg/m³.

Expandovaný perlit se nevyužívá jen ve stavebnictví, ale jeho vlastnosti jsou velmi prospěšné i pro zemědělství (při provzdušňování zeminy, stabilizaci vlhkosti a hnojiv v půdě, ale i ochraně plodin před mrazem). Ve stavebnictví se s expandovaným perlitem dá setkat při výrobě lehčených izolačních omítek, zděicích malt, betonů a izolačních zásypů. Může se také použít pro zateplení staveb, anebo k požární ochraně budov. [3]



Obr. 37: Expandovaný perlit (Zdroj: www.drevoastavby.cz)

Vermikulit je tmavě hnědý až tmavě šedozelený, hydratizovaný hořečnato-hlinitý slídovitý křemičitan vzniklý zvětráváním jiných slíd. Vzniká při pálení (teploty do 800 °C) slídových minerálů, které zvětšují svůj objem. Využívá se pro průmyslové tepelné izolace, tepelně izolační malty a betony, dále pro výrobu laků a barev v chemickém průmyslu. Ve stavebnictví se vzhledem k malé pevnosti v tlaku dá použít jen jako tepelně izolační materiál a protipožární ochrana konstrukcí). [3] [23]

Expandit se získává expandováním břidlice. Výroba je velmi podobná keramzitu. Vzniká prudkým pálením povrchu drcených zrn přírodních hornin, čímž nastává jejich slinutí. Výhodou těchto hornin je to, že se před výpalem téměř nemusí upravovat. Výpal musí probíhat intenzivně, aby povrch zrn slinul co nejrychleji. Na povrchu je cihlově červený, uvnitř fialově šedý až tmavohnědý. Expandit je používán ke zlepšování izolačních vlastností mezerovitých betonů a jako kamenivo pro konstrukční lehké betony. [3] [23]

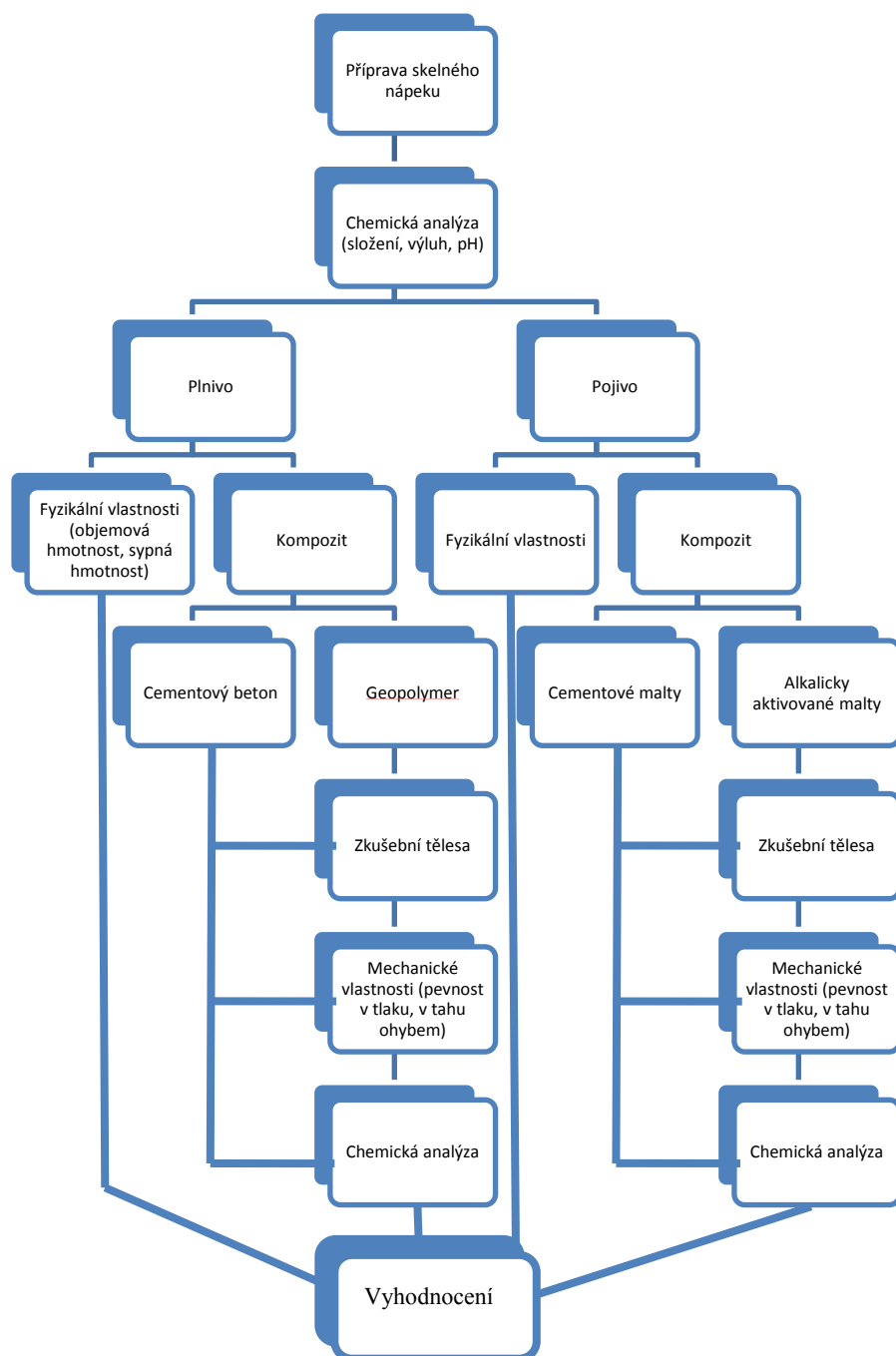
3. Cíl práce

Cílem diplomové práce je prozkoumat možnost využití skelného nápeku vznikajícího při spalování biomasy ve výrobě stavebních hmot. Na základě charakteristického povrchu získaného nápeku (spalovna biomasy Velký Karlov), pro který je typická pórovitá sklovitá struktura, bude v práci ověřována možnost jeho využití zejména jako lehkého plniva do betonu. V první fázi experimentální části budou zkoušeny jeho fyzikální a mechanické a chemické vlastnosti. Vlastnosti a chování této suroviny bude následně pozorováno na vlastnostech zhotovených zkušebních těles, kde jako matrice byly vybrány dva rozdílné pojivové systémy – portlandský cement a alkalicky aktivovaná jemně mletá vysokopecní granulovaná struska.

V další fázi experimentální části bude zjišťováno, zda je daná surovina vhodná pro použití ve formě jemně mleté příměsi. Kromě fyzikálně mechanických a chemických vlastností bude sledována možnost částečné náhrady cementu.

4. Metodika

4.1 Vývoj diagramu metodiky



5. Popis fyzikálních a mechanických zkoušek

5.1 Příprava skelného nápeku

Získaná surovina ze spalování biomasy - skelný nápek byl získán přímo ze spalovny ve Velkém Karlově ve formě křehkých, ale velmi tvrdých kusů větších rozměrů, proto bylo zapotřebí jej zpracovat. Zpracování spočívalo v ručním a následně strojním nadrcení za současného odstranění jemnozrnného prachu a jiných nečistot. Nápek se rozdrtil na menší frakce s odhadem na maximální velikost 32 mm. Tato frakce se umístila do laboratorního čelistového drtiče (Obr.38), kde se nápek rozdrtil ještě na menší zrna. Dále následovalo ruční propírání nápeku, tak aby byly odstraněny všechny nečistoty a odplavitelné částice. Propraný nápek se umístil do sušicí komory na 24 hodin při teplotě 110 ± 5 °C. Poté následovalo roztrídění na jednotlivé frakce 0/4, 4/8, 8/16, 16/32. Pro stanovení zkoušek jemně mleté suroviny byl nápek rozemlet na jemnozrnný filler v planetovém mlýnu. Vše bylo provedeno ve školní laboratoři.



Obr. 38: Laboratorní čelistový drtič

5.2 Plnivo

Základní požadavky kameniva do betonu jsou stanové v normě ČSN EN 12620+A1 a normě pro pórovité kamenivo do betonů, malt a injektážních malt ČSN EN 130055-1. Tyto požadavky jsou zaměřené na geometrické, chemické a fyzikální vlastnosti kameniva.

5.2.1 Stanovení objemové hmotnosti

Stanovení objemové hmotnosti bylo provedeno dle ČSN EN 1097-6 [29].

Postup

Nejdříve se připraví dvě dílčí navážky. Každá musí mít volně sypaný objem mezi 0,5l a 0,6l. Dílčí navážka se vysuší v sušárně při teplotě $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ do ustálené hmotnosti. Ponechají se ochladit na okolní teplotu. Navážka se proseje na síť 31,5 mm a síť 4mm a odstraní se všechna zachycená zrna na síť 31,5 nebo propadlá sítem 4 mm. Zbytek dílčích navážek se zváží, M_4 .

Dále se provádí kalibrace pyknometru. Sestava se naplní vodou o teplotě $(22 \pm 3)^{\circ}\text{C}$ a vloží se nejméně na jednu hodinu do vodní lázně o teplotě $(23 \pm 3)^{\circ}\text{C}$. Voda se doplní k rysce na nálevce a pyknometr se vyjme z vodní lázně opatrně se osuší z vnější strany a s přidanou mřížkou (zabraňuje lehčímu kamenivu plavat) se zváží, M_3 .

První dílčí navážka se vloží opatrně do pyknometru a ze shora přiložíme mřížku. Pyknometr se naplní vodou o teplotě $(23 \pm 3)^{\circ}\text{C}$. Čas se začne sledovat, až když je většina kameniva ponořena ve vodě. Na pyknometr se nasadí nálevka a voda se doplní po značku na nálevce. K odstranění zachyceného vzduchu se musí uzavřená nádoba jemně protřepat nebo poklepat. V průběhu zkoušky se doplňovala voda, která se nám vypařovala. Po (300 ± 15) sekundách se pyknometr zváží, M_2 . Další měření následuje po (60 ± 2) minutách se zváží $M_2(1\text{h})$. Poté následuje další zvážení až po $(24 \pm 0,5)$ h , $M_2(24\text{h})$. Voda se pyknometru vylije a kamenivo se přenesu na suchou utěrku a povrchová voda se odstraní jemným převalováním v utěrce po dobu menší jak 15 s. Kamenivo se pak zváží. $M_1(24\text{h})$.

Stejný postup se opakuje s druhou navážkou. Tyto dvě navážky se zprůměrují a vyjádří se jejich hodnota s přesností 0,01 Mg/m³.

Výpočet a vyjádření výsledků:

Zdánlivá objemová hmotnost zrn

$$\rho_{La} = \rho_w * \frac{M_4}{M_4 - M_2(24h) - M_3} \quad (1)$$

Objemová hmotnost zrn vysušených v sušárně

$$\rho_{Lrd} = \rho_w * \frac{M_4}{M_1(24h) - (M_2(24h) - M_3)} \quad (2)$$

Objemová hmotnost zrn nasáklých a povrchově osušených

$$\rho_{Lssd} = \rho_w * \frac{M_1(24h)}{M_1(24h) - (M_2(24h) - M_3)} \quad (3)$$

Nasákavost po 24 hodinách

$$W_{AL24} = 100 * \frac{(M_1(24h) - M_4)}{M_4} \quad (4)$$

Legenda

ρ_{La}	Zdánlivá objemová hmotnost zrn, v Mg/m^3 .
ρ_{Lrd}	Objemová hmotnost zrn vysušených v sušárně, v g.
ρ_{Lssd}	Objemová hmotnost nasáklých a povrchově osušených, v g.
ρ_w	Hustota vody při zkušební teplotě, v Mg/m^3 .
$M_1(24h)$	Hmotnost nasáklého a povrchově usušeného kameniva na vzduchu po 24h, v g.
$M_2(24h)$	Hmotnost pyknometru, nálevky a mřížky, vody a nasáklého kameniva po 24h, v g.
M_3	Hmotnost pyknometru, nálevky, mřížky a odměřené vody, v g.
M_4	Hmotnost vysušeného kameniva, v g.
W_{AL24}	Nasákavost po 24 hodinách, v %.

5.2.2 Stanovení sypné hmotnosti kameniva

Stanovení sypné hmotnosti kameniva bylo provedeno dle normy ČSN EN 1097-3 [30].

Tab. 2: Nejmenší objem nádoby v závislosti na zrnění kameniva ČSN EN 1097-3

Horní zrno kameniva (D) [mm]	Objem [l]
Do 4	1,0
Do 16	5,0
Do 31,5	10
Do 63	20

Postup

Připraví se tři dílčí navážky pro frakci do 4 mm na 1,0 l. Vysuší se při $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ do ustálené hmotnosti.

Zváží se prázdná, suchá a čistá nádoba (m₁). Nádoba se umístí na vodorovnou plochu a s použitím lopatky se přeplní kamenivem. Při plnění se nutno zabránit segregaci opřením lopatky na horní okraj nádoby. V žádném případě nesmí být konec lopatky výše než 50 mm nad horním okrajem nádoby.

Opatrně se odstraní přebytečné kamenivo nad horním okrajem nádoby, přičemž je nutno zabránit segregaci kameniva na povrchu. Povrch kameniva se opatrně zarovná pravítkem, aby nedošlo ke zhutnění jakékoliv části povrchu. Pokud to není proveditelné, zarovná se povrch ručně, tak aby objem kameniva byl pokud možná stejný jako objem nádoby. Zváží se naplněná nádoba a zaznamená se její hmotnost na 0,1% (m₂). Tento princip se provede 3x.

Stejný postup se provede pro frakci do horního zrna kameniva 16 mm.

Výpočet a vyjádření výsledků:

Zaznamená se objemová hmotnost volně sypaného kameniva jako průměrná hodnota tří hodnot zaokrouhlená na tři desetinná místa.

$$\rho_b = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (5)$$

Legenda

- ρ_b Sypná hmotnost volně sypaného kameniva, v megagramech na metr krychlový.
- m₂ Hmotnost nádoby se zkušební navážkou, v kilogramech.
- m₁ Hmotnost prázdné nádoby, v kilogramech.
- V Objem nádoby, v litrech.

5.2.3 Tvarový index

Zkouška tvarového indexu byla provedena dle ČSN EN 933-4 [31].

Postup

Jednotlivá zrna zkušebního vzorku zkušebního kameniva se roztřídí na základě poměru jejich délky L ke tloušťce E pomocí dvoučelistového posuvného měřítka (Obr.39). Zkouška je provedená ze dvou rozličných velikostí zrn a to frakcí 4/8 a 8/16. Vzorky se zmenší v souladu s požadavky uvedenými v EN 933-2. Dále se vzorky vysuší při teplotě $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ do ustálené hmotnosti. Proseje se na příslušných sítích při dostatečném třepání, aby bylo dosaženo úplné oddělní zrn větších než 4 mm. Vyřadí se zrna, která zůstanou na zkušební síti 16 mm a ty, které propadnou sítí 4 mm. Jednotlivé frakce se zváží a zaznamenají M_1 . A posuzují se délka L a tloušťka E každého zrna pomocí dvoučelistového posuvného měřítka.

Oddělí se zrna, která mají rozměrový součinitel $L/E > 3$. Tato zrna jsou klasifikována jako nekubického tvaru. Tyto zrna se zváží a zaznamená se jejich hmotnost jako M_2 .

To samé se provede pro kamenivo z míchačky.



Obr. 39: Stanovení tvarového indexu pomocí dvoučelistového posuvného měřítka

Výpočet a vyjádření výsledků:

Tvarový index

$$SI = \frac{M_2}{M_1} * 100 \quad (6)$$

Tvarový index se zaokrouhluje na celé číslo.

Legenda

M_1 Hmotnost zkušební navážky, v gramech.

M_2 Hmotnost nekubických zrn, v gramech.

Poznátky

Při míchání betonu v míchačce se viditelně změnil tvar zrn skelného nápeku. V důsledku obrušování a drcení způsobené rotujícími lopatkami míchačky. Proto se provede tato zkouška znovu. Nejprve se odeberou frakce skelného nápeku a umístí se do míchačky po dobu 4 minut, následně se odeberou vzorky a provede se zkouška tvarového indexu. Zjistí se o kolik se změní tvar a počet nekubických zrn. Zjištěné výsledky jsou uvedeny v kapitole 7. Výsledky zkoušek.

5.2.4 Sítový rozbor

Sítový rozbor se provádí dle normy ČSN EN 933-1 [32].

Postup

Navážka se určí dle tabulky č. 3.

Tab. 3: Minimální velikosti zkušebních navážek ČSN EN 933-1

Velikost kameniva D (max)mm	Hmotnost kameniva kg	Objem pórovitého kameniva litrů
90	80	-
32	10	2,1
16	2,6	1,7
8	0,6	0,8
≤ 4	0,2	0,3

Praní

Nejprve se provede praní zkušební navážky. Vloží se do nádoby a přidá se dostatečné množství vody tak, aby byla zkušební navážka pod vodou. Vzorek se dostatečnou silou promíchá, aby se dosáhlo úplného oddělení a uvolnění jemných částic. Síto o velikosti ok 0,063 mm se navlhčí z obou stran a na toto síto se nasadí odlehčovací síta o velikosti ok 1 nebo 2 mm. Vzorek se sype na horní síto a promývá se vodou tak dlouho, dokud neodtéká čirá voda. Zůstatek nad sítem o velikosti ok 0,063 se vysuší při $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ do ustálené hmotnosti. Nechá se vychladnout, zváží se a zaznamená hmotnost M_2 .

Prosévání

Dále se provede prosévání na soustavě sít (Obr.40). Propraný a vysušený materiál se nasype na síta, která jsou sestavena do sloupce. Síta budou sestavena od nejmenších otvorů po největší (0,063; 0,125; 0,250; 0,500; 1; 2; 4; 8 mm). Horní síto se opatří víkem a pod dolním sítem dnem.

Navážka kameniva se po dávkách nasype na horní síto, uzavře se víkem a upevní se přitlačnou deskou prosévacího přístroje. Sítovací zařízení mechanicky otřásá sloupcem sít. Po ukončení zkušebního cyklu se postupně odebírají jednotlivá síta a ručně se dokončí prosévání. Aby se zabránilo přetížení sít, množství materiálu na každém sítě v g po ukončení prosévání nesmí být větší než:

$$\frac{A \cdot \sqrt{d}}{200} \quad (7)$$



Obr. 40: Laboratorní soustava sít

Legenda

- A plocha síta, v mm²
d velikost otvorů, v mm

Vážení

Zváží se zachycený materiál na sítě s otvory největší velikostí a jeho hmotnost se zaznamená jako R1. Se sítem bezprostředně menším se provede stejná operace a hmotnost zachyceného materiálu se zaznamená jako R2. Získání hmotností jednotlivých podílů

zachyceného materiálu se stejný postup opakuje u všech dalších sítí ve sloupci a tyto hodnoty se zaznamenají. Zbýlý materiál na dně se zváží jeho hmotnost a zaznamená jako P.

Výpočet

Vypočítá se zachycená hmotnost na každém síti jako procento původní suché hmotnosti M_1 . Vypočítá se souhrnné procento propadů každým sítem z původní suché hmotnosti až k síti 0,0063mm, které se vyloučí.

Vypočítá se procento jemných částic f propadlých sítem 0,063mm podle:

$$f = \frac{P \cdot 100}{M_1} \quad (8)$$

Legenda

M_1 Suchá hmotnost zkušební navážky, v kg.

P Hmotnost vytríděného materiálu zbylého na dně, v kg.

Poznátky

Při míchání betonu v míchačce se viditelně změnil tvar zrn skelného nápeku a tím pádem i síťový rozbor, v důsledku obroušování a drcení způsobené rotujícími lopatkami míchačky. Proto se provede tato zkouška znovu. Odeberou se frakce skelného nápeku a umístí se do míchačky po dobu 4 minut, následně se odeberou vzorky a provede se zkouška síťového rozboru. Výsledky jsou uvedeny v kapitole 7.

5.2.5 Stanovení mrazuvzdornosti

Stanovení mrazuvzdornosti bylo provedeno dle ČSN EN 13055-1 [33].

Postup

Připraví se dílčí navážky 3x frakce 8/16 po 1000g a 3x frakce 16/32 po 1500g. Dílčí navážky se promyjí a odstraní odplavitelné částice. Vysuší se do ustálené hmotnosti o teplotě $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$, nechají se vychladnout na okolní teplotu a poté se zváží M_1 .

Připravené dílčí navážky musí být uskladnění při atmosférickém tlaku po dobu (24 ± 1) hodin v kovových nádob a naplní se demineralizovanou vodou o teplotě $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ při čemž

hladina vody musí být nejméně 10 mm nad dílčí navážkou po celou dobu 24 hodin nasákavosti. Nádoby se přikryjí poklicemi a po 24 hodinách se umístí do mrazícího boxu.. Vzdálenosti mezi kovovými nádobami a bočními stěnami nesmí být menší jak 50mm. Nádoby se nesmějí vzájemně dotýkat. Měřicí čidlo musí být umístěno v prostřední kovové nádobě a uprostřed mrazícího boxu, aby se mohla sledovat teplotní křivka. Dílčí navážky jsou vystaveny sérií 20 zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů. Po ukončení posledního cyklu se obsah , každé kovové nádoby vloží na síto mající velikost otvorů poloviny velikosti otvoru dolního síta, které bylo použito pro přípravu dílčí navážky. Navážky se ručně promyjí a prosejí. Zůstatek na sítě se vysuší při teplotě $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ do ustálené hmotnosti, nechá se vychladnout na okolní teplotu a ihned se zváží, M_2 .

Výpočet

Stanovení procentuálního úbytku hmotnosti

$$F = \frac{M_1 * M_2}{M_1} * 100 \quad (9)$$

Legenda

- M_1 Počáteční vysušená celková hmotnost tří dílčích navážek, v gramech.
- M_2 Konečná vysušená celková hmotnost tří dílčích navážek, které zůstaly na specifikovaném sítě, v gramech.
- F Procentní úbytek hmotnosti tří dílčích navážek po střídavém zmrazování a rozmrazování.

5.3 Jemnozrnný materiál

Hlavním cílem je zjistit, zda-li skelný nápek rozemletý na jemnozrnný filler, bude použitelný jako příměs I.či II. druhu. Kromě základní charakteristiky jemně mletého nápeku, pucolánové aktivity bude rovněž sledováno působení jemně mletého nápeku porovnávací metodou na fyzikálně mechanických vlastnostech referenčních cementových zkušebních těles a těles s použitím nápeku jako částečné náhrady cementu. Byl rovněž sledován vliv znečištění nápeku na vlastnosti jemně mletého nápeku. Tento vliv bude

sledován na nepropraném a upraveném/propraném nápeku, který byl zbaven popele a nespálených organických zbytků.

5.3.1 Stanovení měrné hmotnosti pyknometricky

Stanovení měrné hmotnosti pyknometrickou metodou se postupovalo dle ČSN 72 2113 [34]. Předmětem je zjistit zdánlivou měrnou hmotnost sypkého materiálu.

Postup

Nejprve se zváží hmotnost vysušeného pyknometru, m_1 . Zváží se hmotnost navážky skelného nápeku, m .

Do pyknometru se umístí navážka, doplní se destilovaná voda a zváží se jako m_4 . Dále se zváží hmotnost samostatného pyknometru s destilovanou vodou, m_3 . Vše se provede 4x. Změří se teplota kapaliny - $T = 23^\circ\text{C}$ -

$$\rho_s = \frac{m}{m - (m_4 - m_3)} * \rho \quad (10)$$

$$\rho_s = \frac{\rho_{s,99} + \rho_{s,92}}{2} \quad (11)$$

Výsledné hodnoty budou srovnány s CEM I 42, 5R a popílkem Dětmarovice.

Legenda:

m_1	- hmotnost vysušeného pyknometru, v gramech
m	- hmotnost skelného nápeku, v gramech
m_3	- hmotnost pyknometru s navážkou a kapalinou, v gramech
m_4	- hmotnost pyknometru s kapalinou, v gramech
ρ	- hustota vody jako funkce teploty při teplotě 23°C , v megagramech na metr krychlový
ρ_s	- měrná hmotnost navážky, v gramech na centimetry krychlový

5.3.2 Stanovení sypné hmotnosti

Postatou zkoušky je zjistit hmotnost vysušeného vzorku v odměrné nádobě a vypočte se sypná hmotnost volně sypaná a v setřeseném stavu. Mezerovitost v procentech se vypočte ze sypné hmotnosti setřeseného stavu a měrné hmotnosti. Dle ČSN 72 2071 [35]. Sypná hmotnost v setřeseném stavu a mezerovitost se dále použije k zjištění měrného povrchu pomocí Blainové metody.

Postup zkoušky pro sypnou hmotnost volně sypanou

Nápek vysušený při teplotě 105°C až 110°C se volně bez otřesů sype do odměrné nádoby. Přebytké množství vzorku se seřízne ocelovým pravítkem, aniž se nápek stlačí. Odměrná nádoba se zváží prázdná bez nápeku a potom se vzorkem s přesností na 1g.

$$\rho_b = \frac{(m_2 - m_1)}{V} \quad (12)$$

Postup zkoušky pro sypnou hmotnost setřesenou

Na začátku zkoušky se postupuje jako při zkoušce volně sypané sypné hmotnosti. Předem zvážená odměrná nádoba se volně naplní popílkem. Pak se umístí na vibrační stůl a přitom se dosypává další nápek tak dlouho, až vzorek zůstává beze změn na horním okraji odměrné nádoby. Přebytké množství vzorku se seřízne ocelovým pravítkem, aniž se nápek stlačí. Odměrná nádoba se zváží prázdná bez nápeku a potom se vzorkem s přesností na 1g.

$$\rho_s = \frac{(m_2 - m_1)}{V} \quad (13)$$

Výsledné hodnoty budou srovnány s CEM I 42,5 R a popílkem Dětmarovice.

Legenda:

m_2	- hmotnost nádoby se zkušební navážkou, v kilogramech
m_1	- hmotnost prázdné nádoby, v kilogramech
m_{2s}	- hmotnost nádoby se zkušební navážkou v setřeseném stavu, v kilogramech.
V	- objem nádoby, v litrech
ρ_b	- je sypná hmotnost volně sypaného nápeku, v g/cm ³
ρ_s	- je sypná hmotnost setřeseného nápeku, v g/cm ³
v_b	- je mezerovitost volně sypaného nápeku v %

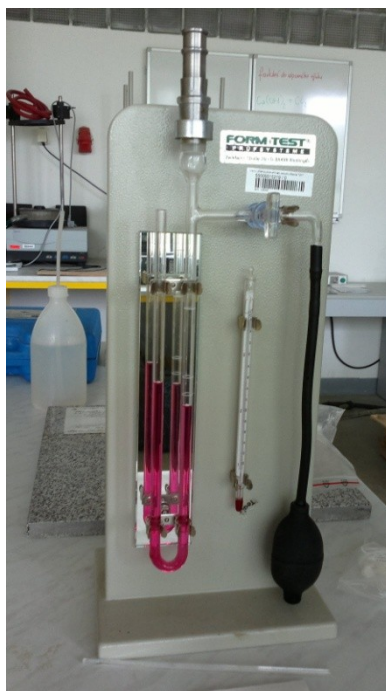
v_s - je mezerovitost setřeseného nápeku v %

5.3.3 Stanovení měrného povrchu práškových látek - Blainova metoda

Metoda pro stanovení vnějšího povrchu práškových látek byla provedena dle ČSN EN 196-6 [37]. Je založena na propustnosti plynů porézní vrstvou stlačené práškové látky. Princip spočívá ve stanovení rychlosti průchodu vzduchu vzorkem s danou pórovitostí a rozměrem. K výpočtu je potřeba znát měrnou hmotnost, sypnou hmotnost v setřeseném stavu a mezerovitost.

Postup

Pro stanovení měrného povrchu vzorku je potřeba vypočítat navážku. Do komůrky Blainova přístroje (obr. 41) se postupně vloží: děrovaný kotouček, skleněnou tyčinkou se na něj vyrovná (tak aby přilehl na kotouček) filtrační papír, vsype se navážka vzorku, poklepáním na stěny komůrky se vyrovná vzorek rovnoměrně na filtračním papíru, na vzorek se přiloží další filtrační papír a následně se vsune do komůrky píst. Píst se opatrně silně stlačí dolů, na vznikající lože, až se spodní strana hlavy pístu dotkne komůrky, poté se píst pomalu nadzdvihne o několik mm, pootočí se o 90° a stlačení se zopakuje. Lože je po vyjmutí pístu připraveno na zkoušku propustnosti dle Blaina. Stanovení spočívá v měření času (na stopkách), za který poklesne meniskus kapaliny v manometrické trubici mezi dvěma značkami; pro jednotlivé vzorky od každého materiálu se čas měří zvlášť.



Obr. 41: Blainův přístroj

Výpočet

$$m = (1 - v_s) * \rho_s * V \quad (14)$$

$$S = \frac{\rho}{\rho_0} * \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{t_0}} * S_0 \quad (15)$$

Výsledné hodnoty jsou srovnány CEM I 42,5 R a popílkem Dětmárovice.

Legenda:

m - navážka vzorku, v gramech

v_s - mezerovitost %

ρ_p - sypná hmotnost setřesená, v g/cm^3

ρ_0 - hustota standardu, v g/cm^3

V - objem prostoru komůrky, $V=1,845 \text{ cm}^3$

t_1, t_2, t - čas poklesu menisku v manometrické trubici při měření vzorku, v sekundách

t_0 - čas poklesu menisku v manometrické trubici při měření standardu, v [s]

S - měrný povrch vzorku, v cm^2/g

S_0 - měrný povrch standardu (cement), v cm^2/g

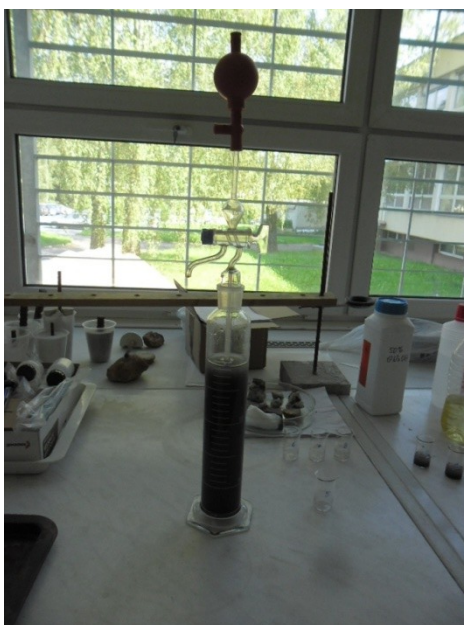
5.3.4 Stanovení sedimentace - Andreasenova metoda

Stanovení sedimentace bylo provedeno dle ČSN 72 1127 [38]. Sedimentační metody se používají pro určování velikostí částic u materiálu s částicemi pod 60 resp. pod 40 μm . To znamená, že se obvykle používají ke stanovení velikostí částic propadlých pod nejmenším sítím, kterým bývá síto s oky 0,063 mm.

V našem případě se tato zkouška prováděla 10x, kde byli odebrány vzorky a rozemlety v planetovém mlýnku v určitých časových intervalech (2min, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 20, 30).

Postup

Naváží se vzorek 10 g. Pro zvolené hodnoty průměru částic d a výšky h se vypočte doba sedimentace t (s), která se převede na hodiny a minuty (zvolené d a h jsou uvedeny v následující tabulce), vypočtené časy se zapíší do tabulky; doplní se také intervaly velikostí částic. Vzorek se vnese v suspenzi do Andreasenovi pipety (Obr. 42). Doplní se odměrný válec destilovanou vodou po značku h_0 . Promíchá se vzorek, a začne se měřit čas a zároveň ihned (tedy v čase t_0) se odebere 1. podíl (základní odběr), který se vypustí do zvážené nádoby. Odebraný podíl se vysuší do konstantní hmotnosti. Následuje další odběr v čase t_1 , t_2 atd.



Obr. 42: Andreasenova pipeta

Výpočet

$$p = \frac{m_0 - m_1}{m_0} * 100 \quad (8)$$

$$p = \frac{m_1 - m_2}{m_0} * 100 \quad (9)$$

5.3.5 Metody stanovení pucolánové aktivity

Pucolánovou aktivitu můžeme stanovit sledováním mineralogie, fyzikálních a chemických vlastností. Testy se provádějí buď na vlastní surovině (metody přímé i nepřímé), anebo v součinnosti suroviny a pojiva (vápno, cement – metody nepřímé). Metody sledování pucolánové aktivity můžeme rozdělit na metody přímé (sledování přítomnosti a změn Ca(OH)_2 pomocí analytických metod) a metody nepřímé, které jsou založeny na měření fyzikálních vlastností zkoušených vzorků. Mezi nepřímé metody můžeme zahrnout například stanovení pevnostních charakteristik, kalorimetrické vyhodnocení, neboli sledování vývinu tepla během reakce, ale třeba také test elektrické vodivosti. [54]

Existuje celá řada metod určení pucolánové aktivity. Přehledně je rozdělení těchto metod sepsáno v bakalářské práci [55], dále bude uveden krátký popis pouze metod, které byly využity pro stanovení pucolanity jemně mletého nápeku.

Jedná se o chemickou analýzu, Chapelle test, stanovení počátku doby tuhnutí, kalorimetrické vyhodnocení a pevnostní charakteristiky v matrici cementové a geopolymerní.

Chemická analýza

Chemická analýza patří mezi nepřímé metody. Pucolánová aktivita závisí především na obsahu reaktivních (amorfních) složek, zároveň má tendenci se zvyšovat úměrně s nárůstem jejich obsahu. Je tedy zřejmé, že míru pucolanity lze do jisté míry predikovat z poměrného množství zmíněných reaktivních složek v dané surovině. Normativní předpisy (standards ASTM) u pucolánů stanovují požadavky na chemické složení a to především z důvodu kategorizace různorodých pucolánů. Například ASTM C 618 vyčleňuje pro přírodní pucolány skupinu N, u které má být součet $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ minimálně 70 %. [56]

Stanovení pucolánové aktivity - Chapelle test

Pro stanovení pucolánové aktivity byla použita upravená metoda Chapelle test dle metakaolin.info [40] a dle ČSN EN 196-5 [39] Zjišťuje se zde množství hydroxidu vápenatého obsaženého ve skelném nápeku.

Postup

Naváží se 2g vápna a 1g skelného nápeku, dohromady se smísí v kádince. Provede se 2x. Dále se naváží referenční vzorek- 2g vápna do kádinky. Do připravených vzorků v nádobách, se přidá 200ml horké destilované vody a nechá se třepat 24h. Následně se provede filtrace vzorku.

Do baňky s profiltrovaným vzorkem se přidají 3 kapky fenolftaleinu, přičemž se zbarví do fialova, následně se provádí titrace dokud vzorek není opět čirý. Tento postup se aplikuje 3x.

$$mg Ca(OH)_2 = 2 * \frac{V1-V2}{V1} * \frac{74}{56} * 1000 \quad (18)$$

Výsledné hodnoty jsou srovnány s vápnem.

Legenda:

V1 - (ml), je objem 0,1 N kyseliny chlorovodíkové potřebné pro 25 ml roztoku získaného při referenčním vzorku

V2 - (ml), je objem 0,1 N kyseliny chlorovodíkové potřebné pro 25 ml roztoku získaného reakcí

5.3.6 Stanovení normální hustoty - Vicatuv Přístroj

Zkouška stanovení normální hustoty byla provedena v souladu s požadavky dle ČSN EN 196-3 [36].

Cementová kaše normální konzistence projevuje určitý odpor proti vnikání normalizovaného penetračního válečku. Množství vody, potřebné pro takovou kaši, se stanovuje pokusným vnikáním penetračního válečku do kaši s různým obsahem vody.

Tuhnutí se sleduje vnikáním jehly do cementové kaše normální konzistence, až je dosaženo určité předepsané hodnoty.

V této zkoušce se namíchá jeden referenční vzorek a dva vzorky se skelným nápekem a určí se jejich normální hustota.

Postup

Před provedením zkoušky se Vicatův přístroj (Obr. 43) nastaví na nulovou polohu. S přesností $\pm 1\text{g}$ se naváží 500g CEM 42,5R a 140g vody. Celková doba míchání trvá 3 minuty. V co nejkratším čase se vnese voda a cement do míchačky. Zapnutím míchačky začínáme měřit čas 90 sekund. Poté míchání zastavíme na dobu 30 sekund, během níž se stěrkou setře všechna cementová kaše, která se přichytí na stěnách a spodní části nádoby a umístí se do středu nádoby. Míchačka se uvede znovu do chodu nízkou rychlostí na dalších 90 sekund.

Vicatův prstenec a podložní destičku lehce potřeme olejem. Po zamíchání se kaše bez nadměrného hutnění nebo otřesů naplní s přebytkem do Vicatova prstence, umístěného na podložní destičce. Vzduch v kaši se odstraní poklepáváním prstence. Horní povrch kaše se uhladí pomocí pravítka. Referenční vzorek se míchá tak dlouho, až je dosažena vzdálenost mezi spodní plochou penetračního válečku a podložní destičkou $6 \pm 2\text{ mm}$. Po dosažení normální konzistence, se stanoví normální hustota cementové kaše, tak že se vypočte vodní součinitel (množství vody ku množství cementu) s přesností 0,5%.

Dále se vytvoří dva vzorky cementové kaše s obsahem skelného nápeku. Naváží se 400g CEM 42,5 R ,100g skelného nápeku a 145g vody. Zamíchá se cementová kaše a určí se jejich normální hustota.



Obr. 43: Vicatův přístroj (Zdroj: homel.vsb.cz)

5.3.7 Stanovení doby tuhnutí

Tato zkouška byla provedena v souladu s požadavky dle ČSN EN 196-3 [36].

V této zkoušce se určuje počátek a konec doby tuhnutí pro jeden referenční vzorek a dva vzorky se skelným nápekem. Příprava cementové kaše je obdobná jako u stanovení normální hustoty.

Postup stanovení počátku tuhnutí

Vicatův přístroj se nastaví do nulové polohy (hrot jehly se spustí na podkladní skleněnou destičku, stupnice se vynuluje). Následně se jehla zvedne. Vicatův prstenec se naplní cementovou kaší normální hustoty a povrch se zarovná. Naplněný Vicatův prstenec umístěný na skleněné destičce se vloží do nádoby a doplní se vodou tak, aby povrch byl nejméně 5 mm pod hladinou vody a uloží se do prostředí s kontrolovanou teplotou (20 ± 1) °C. Po určité době se naplněný Vicatův prstenec vloží do zkušebního zařízení, jehla se zajistí v takové poloze, aby se hrotem dotýkala povrchu cementové kaše (1 až 2 s). Jehla začne vnikat do cementové kaše. Po uvolnění zajišťovacího šroubu jehla vniká do cementové kaše, hloubka vniknutí se odečte nejpozději do 30 sekund.

Počátek doby tuhnutí se uvádí na stejném vzorku cca po 10 min. a na vhodných místech (vzdálenost nejméně 8 mm od okraje prstence a 5 mm od sebe a nejméně 10 mm od

posledního vpichu). Počátkem tuhnutí se rozumí doba, která uplyne od vsypání cementu do míchačky (nulový čas) až do okamžiku, kdy vzdálenost mezi jehlou a destičkou činí (6 ± 3) mm.

5.3.8 Kalorimetrie

Kalorimetrie se provádí dle ČSN 72 2118 [41]. Sleduje se průběh vývinu hydratačního tepla pojiva (cementu, jemně mletý nápek) a určí se vliv působení skelného nápeku.

Postup

Připraví se tři dílčí navážky 0,5g skelného nápeku + 4,5g CEM I 42,5R, 1g+4g CEM, 2g + 3g CEM a 1x 5g CEM I 42,5 které se umístí do nádob a vše se vloží do kalorimetru.

5.4 Chemická analýza

5.4.1 Difrakce výkvětu a skelného nápeku (Měření amorfního podílu)

Stanovení krystalického a amorfního podílu minerálních látek metodou rentgenové difrakční analýzy (XRD) výkvětu a skelného nápeku.

5.4.2 Prvková analýza skelného nápeku a výkvětu pomocí Spektrometru NITON XL3T GOLDD

Stanovení analýzy chemického složení skelného nápeku a výkvětu pomocí rentgenového spektrometru (Obr. 44).



Obr. 44: Rentgenový spektrometr (Zdroj: www.bas.cz)

Postup

Zkoušený vzorek se umístí do plastové nádoby, jejíž jednu stranu tvoří tenká folie. Touto stranou se uloží na spektrometr a spustí se měření. Výsledky se zobrazují okamžitě po startu měření. Analýza byla provedena u vzorků propraného i nepropraného skelného nápeku a rovněž výkvětu.

Toto zařízení využívá pro buzení vzorku kompaktní rentgenku s výkonem 4W. Analýza je založena na detekci a následném spektrálním vyhodnocení RTG záření. Rozměry detektoru a jeho uspořádání umožňuje dosažení dostatečné citlivosti a výjimečných detekčních limitů, díky čemuž lze analyzovat prvky od hořčíku až po uran.

5.4.3 Analýza skelného nápeku pomocí RTG diraktometru D8 Advance firmy Bruker AXS

Principiálně se jedná o RTG difraktometr, určený ke zkoumání materiálů, práškové difrakci a difrakci s vysokým rozlišením.

Stanovení minerálních fází RTG analýzou dle ČSN EN 13925-1 a Anorganická databáze difrakčních dat PDF-2, Release 2011, Diffrac plus prof. TOPAS STRUCTURAL database. [50]

Postup

Připraví se navážka 0,2 g. Připravená navážka se umístí do zkušebního přístroje Bruker-AXS D8 Advance.(Obr. 45)

Geometrie měření probíhá: $2\theta/\theta$ s pozičně citlivým detektorem LynxEye za podmínek:

- záření $\text{CoK}\alpha/\text{Fe}$ filtr
- napětí 40 kV
- proud 40 mA
- krokový režim s krokem $0.014^\circ 2\theta$ s časem na kroku 0.25s
- sumace pěti postupných měření



Obr. 45: Zkušební laboratorní přístroje Bruker-AXS D8 Advance. (Německo), (Zdroj: www.bruker.com)

5.4.4 Potenciometrické stanovení pH skelného nápeku a výluhu

Podstatou zkoušky je určit pH vodné suspenze dle ČSN EN ISO 787-9 [42] a ČSN EN 12457-4 [43], zda-li vodní roztok reaguje kyselé či zásaditě.

Postup

Do nádoby se odváží 5 g skelného nápeku a přidá se 50 ml demineralizované vody. Vzorek se ručně protřepe a umístí do třepačky po dobu $5 \pm 0,5$ min. Po protřepání se provede filtrace přes filtrační papír.

Před měřením pH pomocí pH-metru se z kalibruje sonda. Doba jednoho měření je cca 5 min do ustálení hodnoty. Po každém měření byla sonda očištěna demineralizovanou vodou a osušena.

Výsledné hodnoty jsou srovnány s CEM I 42,5 R, popílkem Dětmárovice a sádrrou.

Stanovení pH potenciometrické

Potenciometrické měření pH je metoda využívající pro stanovení koncentrace sledované látky měření elektromotorického napětí elektrochemických článku tvořeného dvěma elektrodami ponořenými do měřeného roztoku. Jedna elektroda je srovnávací (referentní) se známým konstantním elektrodovým potenciálem. Druhá elektroda je indikační (měrná), jejíž potenciál je funkcí aktivity vodíkových iontů a (H^+), závisí tedy na pH.

Stanovení pH výluhu hrubého kameniva a tvorba výkvětů

Podstatou této zkoušky je stanovení chování hrubého kameniva v různých prostředích a náchylnost na tvorbu novotvarů. Jedná se pouze o srovnávací informativní test, v tomto případě nebyla využita žádná z norem. Hrubé kamenivo – nápek (světlý i tmavý, viz obr. 46) bylo ponořeno do pitné vody, destilované vody a dále vodných roztoků $Ca(OH)_2$ a $Na(OH)$. Po ponoření byla zkušební nádoba uzavřena. Na vzorcích byly po dobu tří týdnů sledovány vizuální změny nápeku. Na výluhu pak bylo stanoveno pH pomocí pH metru.

pH Výluhů

Nejprve se připraví roztoky $Ca(OH)_2$ a $Na(OH)$, do kterých se umístí světlé a tmavé skelné nápeky. (Obr.46) Po dobu dvou týdnů se sleduje jejich pH a výskyt výkvětů.

Roztok Ca(OH)_2 : 300g vody
160g vápenného hydrátu (bílé vápno, Kotouč Štramberk Spol. s. r. o.)
Roztok Na(OH) : 240g destilované vody
240g hydroxidu sodného



Obr. 46: Tmavý a světlý skelný nápek v hydroxidu sodném.

Dále byly odebrány vzorky použitých zkušebních těles 100x100x100 z cementových betonů a geopolymérů, které se vložili do pitné vody, destilované vody a hydroxidu vápenatého, kde se sledoval výskyt výkvětu.

5.5 Analýza výluhu skelného nápeku

Na výluhu nápeku připraveném dle norem ČSN 72 0102, ČSN ISO 10523, ČSN EN 459-2, ČSN EN 196-2 a ČSN 830530, část 14, rozemletém 1:10 a profiltrovaném. Byly provedeny následující stanovení.

- Stanovení pH potenciometricky,
- Vlhkost vzorku gravimetricky,
- Vodivost konduktometricky,
- Sulfidy a volné CaO titračně dle uvedených norem,

- Stanovení obsahu prvků Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, P, S a Si ve vodném výluhu, bylo provedeno pomocí atomové emisní spektrometrie (Atomový emisní spektrometr SPECTRO VISION EOP s indukčně vázanou plazmou)

Popis použitých přístrojů

Atomový emisní spektrometr SPECTRO VISION EOP s indukčně vázanou plazmou:

- Využívá se k analýze chemického složení
- simultánní přístroj s axiálně umístěnou Ar/Ar plazmovou hlavici opatřen zmlžovacími systémy umožňující analýzu pitných a silně zasolených kapalných vzorků i vzorků s obsahem kyseliny fluorovodíkové,
- velmi nízké koncentrace umožňuje stanovovat ultrazvukový zmlžovací systém,
- optický automaticky čištěný uzavřený systém naplněný Ar,
- přístroj pracuje v oblasti 120 – 800 nm, umožňuje analýzu 72 prvků,
- malá spotřeba vzorku (cca 5 ml) na záznam plného spektra v celém rozsahu práce přístroje,
- přístroj umožňuje stanovit koncentrace na úrovni mikrogramů je vhodný pro stanovení matričních i stopových obsahů. [53]

Použité metody

Stanovení vodivosti metodou konduktometrie:

Konduktometrie je elektroanalytická metoda založená na měření vodivosti elektrolytů ve vodě či jiném rozpouštědle. Hodnota vodivosti závisí na množství iontů v roztoku obsažených a na jejich pohyblivosti.

5.5.1 Stanovení chloridů

Stanoví obsahu chloridů bylo provedeno dle ČSN EN 14629 [44].

Postup

Naváží se 2,5g skelného nápeku. Vzorek se vsype do kádinky o objemu 250ml a přidá se 100 ml horké destilované vody a nechá se promíchat. Do kádinky se dále přidá 3,46 ml koncentrovaného roztoku HNO_3 . Na vařiči za stálého míchání se přivede k varu a nechá se

vařit 3 minuty. Kádinka se vzorkem se nechá zchladit a následně se umístí na přístroj, kde se určí obsah chloridů potenciometrickou titrací, pomocí roztoku dusičnanu stříbrného. Spotřeba AgNO_3 v průběhu titrace se zaznamenává.

$$CC = \frac{C_{\text{AgNO}_3} \cdot V_{\text{AgNO}_3} \cdot M_{\text{ce}}}{m_{\text{vz}}} \cdot 100\% \quad (19)$$

Legenda:

CC	- je obsah chloridů v %
C_{AgNO_3}	- Koncentrace dusičnanu stříbrného, v mol/l
V_{AgNO_3}	- objem roztoku dusičnanu stříbrného, v litrech
M_{cl^-}	- hmotnostní % chloridového iontu
m	- hmotnost vzorku, g
V"	- objem roztoku dusičnanu stříbrného použitého k titraci, v ml
E''	- potencionální elektromotorické napětí, v mV

5.5.2 Stanovení obsahu síranů

Předmětem zkoušky je zjistit, kolik je v daném vzorku procentuálně obsaženo síranových iontů. Stanovení obsahu síranu bylo provedeno dle ČSN EN 196-2 [45].

Postup

Do 250ml kádinky se s přesností $\pm 0,0005$ g naváží 1g skelného nápeku a přidá se 90 ml vody. Za stálého míchání suspenze se pak přidá 10 ml koncentrované kyseliny chlorovodíkové. Roztok se opatrně zahřívá a vzorek se rozrušuje plochým koncem skleněné tyčinky až se skelný nápek úplně rozloží. Roztok se pak nechá 15 min digerovat při teplotě těsně pod bodem varu. Zbytek se přefiltruje středním papírovým filtrem do 400ml kádinky, promyje se důkladně horkou vodou do vymizení chloridových iontů, což se ověřuje zkouškou dusičnanem stříbrným. Objem roztoku se upraví asi na 250 ml; pokud je to třeba upraví se pH roztoku na hodnotu mezi 1-1,5 kyselinou chlorovodíkovou 1+11 nebo hydroxidem amonným 1+16. Roztok se uvede k varu a povaří se 5 min. Kontroluje se, zda je roztok čirý; jestliže ne opakuje se stanovení s novým vzorkem. Za stálého míchání se k vroucímu roztoku přidá po kapkách 10ml roztoku chloridu barnatého zahřátého pod bod varu. Roztok se udržuje nejméně

30 min těsně pod bodem varu a dbá, se na to aby jeho objem byl udržován mezi 225-250ml. Přikrytá kádinka s roztokem se pak před filtrací nechá stát při teplotě laboratoře 12-24h. Sraženina se filtruje jemným papírovým filtrem a důkladně se promývá vařící vodou do vymizení chloridových iontů, což se ověřuje roztokem dusičnanu stříbrného. Sraženina se pak žihá při teplotě 950 ± 25 °C do ustálené hmotnosti.

$$SO_3 = \frac{m_{10} * 0,343 * 100}{m_9} = 34,3 * \frac{m_{10}}{m_9} \quad (20)$$

Výsledné hodnoty jsou srovnány s popílkem Dětmárovice a struskou Štramberk, Kotouč.

Legenda:

m_9 - je hmotnost zkoušeného vzorku, v gramech

m_{10} - hmotnost síranu barnatého, v gramech

6. Aplikace skelného nápeku do cementových malt, betonů a AAS

6.1 Receptura

Za základě zjištěných fyzikálních vlastností plniva a jemnozrnných materiálů se stanovili základní receptury na cementové malty, betonů a alkalicky aktivovaný kompozitů.

Níže bude označován alkalicky aktivovaný beton jako geopolymery.

Malty: 1 sada na tři zkušební tělesa

- cementové malty:

1CM	CEM 42,5 R, Hranice	450g
	Normalizovaný písek CEN, Tovačov	3 x 450g
	Voda	225g
2CM	CEM 42,5 R, Hranice	360g
	Skelný nápek 0/8, Velký Karlov	90g
	Normalizovaný písek CEN, Tovačov	3 x 450g
	Voda	180g
3CM	CEM 42,5 R, Hranice	350g
	Normalizovaný písek CEN 0/4, Tovačov	527g
	Skelný nápek 0/8, Velký Karlov	477g
	Voda	175g
	Plastifikátor Glenium 110	35,0g

- Alkalicky aktivované malty:

4AAM	Struska, Štramberský kotouč	450g
	Skelný nápek 0/4, Velký Karlov	650,3g
	Destilovaná voda	100ml
	Aktivátor (vodní sklo Kittfort + Na(OH))	127,85g

5AAM	Struska, Štramberk Kotouč	450g
	Skelný nápek nepropraný 0/4, Velký Karlov	650,3g
	Destilovaná voda	100ml
	Aktivátor (vodní sklo Kittfort + Na(OH))	127,85g

Beton: objem 1 m³

- cementový beton

6CB	CEM 42,5 R, Hranice	378kg
	Písek 0/4, Tovačov	958kg
	Skelný nápek 4/8, Velký Karlov	171kg
	Skelný nápek 8/16, Velký Karlov	205kg
	Voda	170kg
	Plastifikátor Glenium 110	378g

- geopolymery

7GEO	Struska, Štramberk Kotouč	378kg
	Písek 0/4, Tovačov	958kg
	Skelný nápek 4/8, Velký Karlov	171kg
	Skelný nápek 8/16, Velký Karlov	205kg
	Voda	170kg
	Aktivátor (Vodní sklo Kittfort + Na(OH))	6,1kg

6.2 Příprava

6.2.1 Cementové a alkalicky aktivované malty, zkušební tělesa, míchání, zrání

Zkušební tělesa

Pro vytvoření zkušebních těles byla použita forma ze tří vodorovných oddílů, která umožňuje vytvořit současně tři zkušební tělesa ve tvaru trámečků o průřezu 40 x 40 x 160 mm. Tato forma se předem vymaže minerálním olejem, aby nedocházelo k přilepení malty na plochy formy a nedošlo, tak ke znehodnocení ztvrdlé malty při odformování. Sestava formy musí být taková, aby nedocházelo při naplňování maltou k tvarové deformaci nebo úniku kapaliny. Musí být dostatečně tuhá. Všechny formy před použitím se zváží a zaznamenají, m_1 .

Míchání

Příprava a míchání bylo provedeno dle normy ČSN EN 196-1. Připraví se referenční malta 1CM s mícháním 450 ± 2 g cementu, 1350 ± 5 g normovaného písku plynulé granulometrie a 225 ± 1 g vody.

Do míchačky (Obr.47) se vlije voda a přidá se celé množství cementu. Spustí se míchání nízkou rychlostí, po 30 sekundách míchání se za chodu vsype písek (při dávkování tří frakcí písku po 450 g postupně od hrubé po jemnou frakci). Vsyp plniva probíhá v intervalu dalších 30 s.

Míchání se nastaví na vysokou rychlost a míchá se dalších 30 s. Míchačka se na 90 s zastaví, prvních 15 s se pomocí gumové stěrky setře z povrchu nádoby malta. Míchání pokračuje vysokou rychlostí v intervalu 60 s. Po ukončení míchání se plní formy s nástavcem. Tyto formy jsou umístěny na magnetickém vibračním stolku a jsou hutněny po dobu 120 s.

Forma se doplní a znovu z vibruje na vibračním stolci (obr.48).



Obr. 47: Laboratorní míchačka na cementové malty



Obr. 48: Laboratorní vibrační stolek (Zdroj: www.bruker.com)



Obr. 49: Cementová malta s nepropraným skelným nápekem



Obr. 50: Vložená záměs alkalicky aktivované malty s nepropraným nápekem na vibračním stolku (5AAM)

Po zhutnění se odstraní nástavec i přebytečná malta a povrch zkušebních těles se zarovná s horním okrajem formy. Vyplněné formy se zváží a zaznamenají.

Na formu se položí skleněná destička síly 6 mm o rozměrech 210x185 mm a forma se vloží do vlhkostní skříně.

Zrání

Doba zrání cementových a alkalicky aktivovaných malt je 28 dní. Pro zkoušky pevností po 28 dnech se vyjmutí zkušebních těles z forem provede 20 až 24 hodin od výroby. Tělesa určená pro vodní uložení se viditelně označí a uloží do vody o teplotě $20 \pm 1^\circ\text{C}$. Trámečky se uloží na rošty (z nekorodujícího materiálu) tak daleko od sebe, aby voda měla přístup ke všem plochám, objem vody na jeden trámeček je asi 1 l a hladina vody musí sahat minimálně 2 cm nad povrch trámečků. Tělesa určená k některému termínu zkoušení se vyjmou z vody maximálně 15 minut před zkouškou, otřou se vlhkou tkaninou a zváží.

Alkalicky aktivované malty se ponechají po celou dobu (28 dní) ve vlhkostní komoře obalené smršťovací PE fólií.

6.2.2 Cementové betony a geopolymery, zkušební tělesa, míchání, zrání

Zkušební tělesa

Pro vytvoření zkušebních těles byly použité formy 150 x 150 x 150, 100 x 100 x 400, 100 x 100 x 100, 150 x 300. Tyto formy se předem vymazali minerálním olejem, aby nedocházelo k přilepení betonu na plochy formy a nedošlo, tak ke znehodnocení ztvrdlého betonu při odformování.

Cementový beton:

Míchání

Namíchají se tři záměsi cementového betonu odvíjející se od základní receptury definované v kapitole 6.1. A dvě záměsi geopolymery.

Do míchačky (Obr.51) nejdříve vkládáme nejhrubší frakce kameniva až po ty nejjemnější. Kamenivo se promíchá a přidá se cement. A opět se promíchá tak, aby přidané složky byly rovnoměrně rozložené. Při míchání se postupně přidává voda a sleduje se konzistence vzniklého čerstvého betonu. Na závěr se přidá plastifikátor.



Obr. 51: (Nalevo) Laboratorní míchačka, (vpravo) vložené frakce kameniva v bubnu míchačky

Po vytvoření čerstvého betonu byla u záměsí provedena zkouška konzistence metodou VeBe. Použitá část čerstvého betonu se vrátí zpět do bubnu míchačky a opět se promíchá. Následně se vyplní čerstvým betonem předem připravené formy a umístí se na vibrační stůl. Vyplněné formy se zváží a zaznamenají.

Zkouška konzistence betonu - VeBe

VeBe přístroj se umístí na tuhý vodorovný podklad, nádoba musí být pevně přichycena k vibračnímu stolu pomocí křídlových matic. Forma se navlhčí a vloží do nádoby.

Forma se plní čerstvým betonem ve třech vrstvách. Každá vrstva se zhutní 25 vpichy propichovací ocelovou tyčí. Beton se zhutňuje na celou výšku první vrstvy. Druhá a vrchní vrstva je zhutněna tak, aby vpichy zasahovaly jen částečně do spodní vrstvy.

Čerstvý beton horní vrstvy se zarovná pomocí propichovací tyče. Forma se opatrně oddělí od betonu. Jestliže se beton usmykne, rozlije, nebo se nedotýká stěn nádoby je nutno tuto skutečnost zaznamenat.

Průhledná kruhová deska se natočí nad beton, uvolní se šroub a deska se spustí na beton. Nastane sednutí, průhledná kruhová destička se zajistí a na měřítku vodící tyče se odečte hodnota sednutí. Následným uvolněním šroubu je umožněno klesání desky na beton. Spustí se vibrace stolku a současně se měří doba, za kterou betonová směs vyplní celou plochu kruhové desky.

Zrání

Vyplněné formy se ponechají 24 hodin tuhnout v laboratorních podmínkách. Po uplynutí této doby se odformují a umístí do vodní lázně na 28 dní a 90 dní.

Poznatky

Zkušební tělesa ponořená ve vodní lázni (obr.52), vykazovala nezvykle výrazné pokrytí bílými výrůstky/výkvěty. Vzorky byly odebrány a byla provedena jejich analýza.



Obr. 52: Cementový beton s výkvěty ve vodní lázni



Obr. 53: Výkvět na zkušebních tělesech v mokrém stavu



Obr. 54: Výkvět na zkušebních těles v suchém stavu

Geopolymer:

Zkušební tělesa

Pro geopolymery byly použité stejné formy pro vytvoření zkušebních těles jako jsou u cementových betonů.

Míchání

Při míchání byly použity dvě záměsi značeny (7GEO42A, 7GEO42B). Nejprve se vytvořil aktivátor (sodné vodní sklo Kittfort + NaOH). Do bubnu míchačky se umístí kamenivo od nejhrubší až po nejjemnější frakci. Promícháme tak, aby frakce byly rovnoměrně rozmístěny. Dále se přidá struska a promíchá se. Následně se postupně přidává voda podle konzistence geopolymery a následně aktivátor. Dobře promíchanou záměs ukládáme do předem připravených forem.

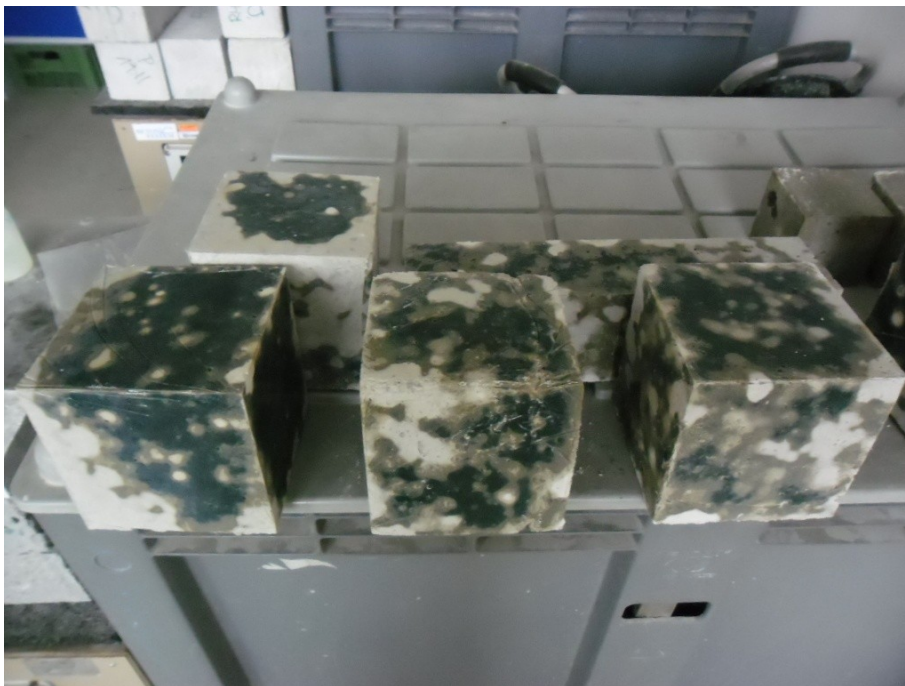
Zrání

Záměs 7GEO42A:

Vyplněné formy se zabalí do smršťovací PE fólie, aby nedocházelo ke styku geopolymery se vzduchem. Ve formě se ponechají 28 dní a 90 dnů, v laboratorních podmínkách.

Záměs 7GEO42B:

Vyplněné formy se umístí do klimatické komory při teplotě 60°C a vlhkosti 90%, a to po dobu prvních dvou dnů zrání, následně byla umístěna v laboratorním prostředí o teplotě 23±2°C a relativní vlhkosti 55±5%. Celková doba tvrdnutí byla 28 dní a 90 dnů. Rovněž byly ze stejné záměsi vytvořena zkušební tělesa, jejichž zrání probíhalo po celou dobu v laboratorním prostředí.



Obr. 55: Zkušební tělesa geopolymery 7GEO42A 150 x 150 x 150 mm

6.3 Stanovení mechanických vlastností

6.3.1 Stanovení pevnosti v tahu za ohybu cementových a alkalicky aktivovaných malt

Stanovení pevnosti v tahu za ohybu se provádí dle ČSN EN 196-1 [46].

Postup

Zkušební těleso (3x 40x40x160 mm) se umístí do zkušebního laboratorního zařízení jednou z bočních stran na válcové podpory tak, aby jeho podélná osa byla k válcovým podporám kolmá na směr plnění. Zatížení se vynakládá přes zatěžovací válec kolmo na protilehlou boční stranu zkušebního tělesa a zvyšuje se rovnoměrnou rychlostí (50 ± 10) N/s až do zlomení. Poloviny vzniklé zlomením zkušebního tělesa se použijí při zkoušce pevnosti v tlaku (viz. kapitola 6.3.3).

Výpočet

Pevnost v tahu za ohybu

$$R_f = \frac{1,5 \cdot F_f \cdot l}{b^3} \quad (21)$$

Pevnost v tahu se vyjádří průměrnou aritmetickou hodnotou ze tří jednotlivých výsledků sady tří trámečku, kdy každý výsledek se vyjádří s přesností 0,1 MPa.

Objemová hmotnost ztvrdlého betonu

$$D = \frac{m}{V} \quad (22)$$

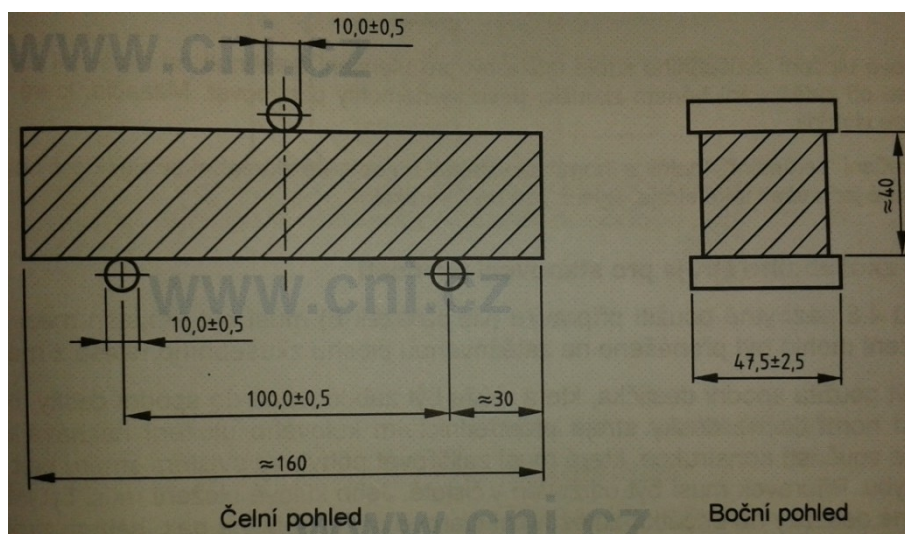
Objemová hmotnost ztvrdlého betonu se zaokrouhlí na nejbližších 10 kg/m³.

Legenda

- R_f Pevnost v tahu za ohybu, v megapascalech.
- b Strana čtvercového průřezu trámečku, v milimetrech.
- F_f Zatížení vynaložené na střed trámečku při zlomení, v newtonech.
- l Vzdálenost mezi podporami, v milimetrech.
- D Objemová hmotnost ztvrdlého betonu, v kg/m³.
- m Hmotnost zkušebního tělesa, v kg.
- V Objem nádoby, v m³.



Obr. 56: Zkušební stroj pro stanovení pevnosti v tahu za ohybu



Obr. 57: Uspořádání zatížení pro stanovení pevnosti v tahu za ohybu, ČSN EN 196-1

6.3.2 Stanovení pevnosti v tahu za ohybu cementových betonů a geopolymérů

Stanovení pevnosti v tahu za ohybu bylo provedeno dle ČSN EN 12390-5. [47].

Postup

Použitá zkušební tělesa 100x100x400.

Odstraní se všechny nečistoty z lisu a povrchu tělesa, které budou ve styku s válečky. Z povrchu těles, která byla ošetřovaná ve vodě, se otře voda před jejich vložením do zkušebního lisu. Těleso se do lisu umístí centricky, podélnou osou kolmo k podélným osám horních a dolních válečků. Je nutno zajistit, aby referenční směr zatěžování byl kolmý na směr ukládání betonu zkušebního tělesa.

Zatěžování se může zahájit v případě že jsou všechny zatěžovací a podpěrné válečky rovnoměrně na zkušebním tělese.

Nastaví se konstantní rychlost zatěžování v rozsahu od 0,04 MPa/s ($\text{N/mm}^2 \cdot \text{s}$) do 0,06 MPa/s ($\text{N/mm}^2 \cdot \text{s}$).

Výpočet

Pevnost v tahu ohybem

$$f_{cf} = \frac{F * l}{d_1 * d_2^2} \quad (23)$$

Pevnost v tahu ohybem se zaokrouhlí na nejbližší 0,1 MPa (N/mm²).

Legenda

- f_{cf} Pevnost v tahu ohybem, MPa (N/mm²).
F Maximální zatížení, v N.
l Vzdálenost mezi podpěrnými válečky, v mm (300mm).
 d_1, d_2 Rozměry příčného řezu tělesa, v mm.



Obr. 58: Zatěžování zkušebního tělesa(cementový beton) se dvěma břemeny

6.3.3 Stanovení pevnosti v tlaku cementových a alkalicky aktivovaných malt

Stanovení pevnosti v tahu za ohybu se provádí dle ČSN EN 196-1 [46].

Postup

Zkouška se provádí na polovinách trámečků zlomené ze zkoušky v tahu za ohybu. (viz. kapitola 6.3.1). Poloviny trámečků se vystředí bočními stranami v rozmezí $\pm 0,5$ mm na destičkách zkušebního stroje a délkově se orientují tak, aby koncové strany trámečků přesahovaly asi o 10 mm destičky, případně pomocné destičky.

Zatížení se zvyšuje plynule rychlostí (2400 ± 200) N/s do porušení.

Pevnost v tlaku se vyjádří průměrnou aritmetickou hodnotou ze šesti jednotlivých výsledků sady tří trámečků, kdy každý výsledek je vyjádřen s přesností 0,1 MPa.

Výpočet

Pevnost v tlaku

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (24)$$

Pevnost v tlaku se vyjádří průměrnou aritmetickou hodnotou ze šesti jednotlivých výsledků sady tří trámečků, kdy každý výsledek je vyjádřen s přesností 0,1 MPa.

Legenda

R_c Pevnost v tlaku, v megapascálech.

F_c Nejvyšší zatížení vynaložené při porušení, v newtonech

1600 Plocha destiček nebo pomocných destiček (40 x 40mm), v milimetrech čtverečních.

6.3.4 Stanovení pevnosti v tlaku cementových betonů a geopolymérů

Stanovení pevnosti v tlaku bylo provedeno dle ČSN EN 12390-3 [48].

Postup

Z povrchu těles se setře voda před jejich vložením do zkušebního lisu. Očistí se dotykové plochy tlačných desek lisu a odstraní se všechny zbytky písku nebo jiného uvolněného materiálu z povrchu zkoušeného tělesa na plochách, které budou v dotyku s tlačnými deskami lisu. Krychle se osadí tak, aby směr zatěžování byl kolmý na směr plnění. Krychle se umístí do středu tlačných desek. Nastaví se konstantní rychlost zatěžování od 0,2 MPa/s ($\text{N/mm}^2/\text{s}$). Zatěžuje se plynule, bez nárazu. Zaznamená se dosažené maximální zatížení.

Výpočet

Pevnost v tlaku

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (25)$$

Pevnost v tlaku se zaokrouhlí na nejbližší 0,1MPa (N/mm^2)

Legenda

f_c pevnost v tlaku, v megapascálech (N/mm^2).

F Největší zatížení při porušení, v N.

A_c Průřezová plocha zkušebního tělesa, na kterou působí zatížení v tlaku, v mm^2

6.3.5 Stanovení statického modulu pružnosti

Stanovení statické modulu pružnosti ČSN ISO 6784 [49].

Postup

Zkušební těleso 150 x 300 mm s osově osazenými přístroji se vloží dostředně do zkušebního lisu. Vyvodí se základní napětí σ_b , tj. $0,5 \text{ N/mm}^2$ a zaznamená se údaje na všech přístrojích.

Napětí se zvyšuje plynule s časovým nárůstem tlaku $(0,6 \pm 0,4) \text{ N/mm}^2$ za sekundu do hodnoty jedné třetiny pevnosti betonu v tlaku ($\sigma_a = f_c/3$). napětí se udržuje 60 s. a v průběhu následujících 30s se opět odečtou údaje na všech přístrojích. Jestliže se jednotlivá vypočtená přetvoření o více než 20% liší od své průměrné hodnoty, opraví se centrace zkušebního tělesa a celý předchozí postup se opakuje. Jestliže není možné zmenšit rozdíly pod 20%, výsledek zkoušky nelze uvažovat.

Jestliže se prokázalo, že centrování je dostatečně přesné, sníží se zatížení na základní napětí stejnou rychlostí jako při zatěžování. tento předběžný cyklus se nejméně opakuje se stejnou rychlostí zatěžování a odlehčování a s udržováním napětí na hodnotách (σ_a a σ_b) po dobu 60s. Po dokončení posledního předběžného zatěžovacího cyklu se vyčká 60s při napětí $\sigma_b = 0,5 \text{ N/mm}^2$ a během následujících 30s se zaznamenají poměrná přetvoření ϵ_b .

Výpočet

Statický modul pružnosti v tlaku

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\epsilon_a - \epsilon_b} \quad (26)$$

výsledek se zaokrouhlí na nejbližší 500 N/mm^2 je-li hodnota vyšší jak $10\,000 \text{ N/mm}^2$ a na nejbližší 100 N/mm^2 při hodnotách pod $10\,000 \text{ N/mm}^2$.

Legenda

- σ_a Horní zatěžovací napětí v N/mm^2 ($\sigma_a = f_c/3$).
- σ_b Základní napětí (tj. $0,5 \text{ N/mm}^2$).
- ϵ_a Průměrné poměrné přetvoření při horním zatěžovacím napětí.
- ϵ_b Průměrné poměrné přetvoření při základním napětí.

E_c Statický modul pružnosti v tlaku, v newtonech na milimetr čtvereční.



Obr. 59: Zkouška statického modulu na zkušebním tělese geopolymeru, 150 x 300 mm

7. Výsledky zkoušek

7.1 Plnivo

7.1.1 Stanovení objemové hmotnosti

Tab. 4: Výsledné hodnoty objemových hmotností a nasákavosti

frakce	4 - 31,5
Zdánlivá objemová hmotnost zrn [Mg/m^3]	1,79
Objemová hmotnost zrn vysušených v sušárně [g]	1,72
Objemová hmotnost zrn nasáklých a povrchově osušených [g]	1,83
Nasákavost po 5min [%]	13
Nasákavost po 1h [%]	13
Nasákavost po 24h [%]	13

7.1.2 Stanovení sypné hmotnosti kameniva

Tab. 5: Výsledné hodnoty sypné hmotnosti volně sypaného kameniva

Frakce	0 - 4	8 - 16
.Sypná hmotnost volně sypaného kameniva [Mg/m^3]	0,828	0,730

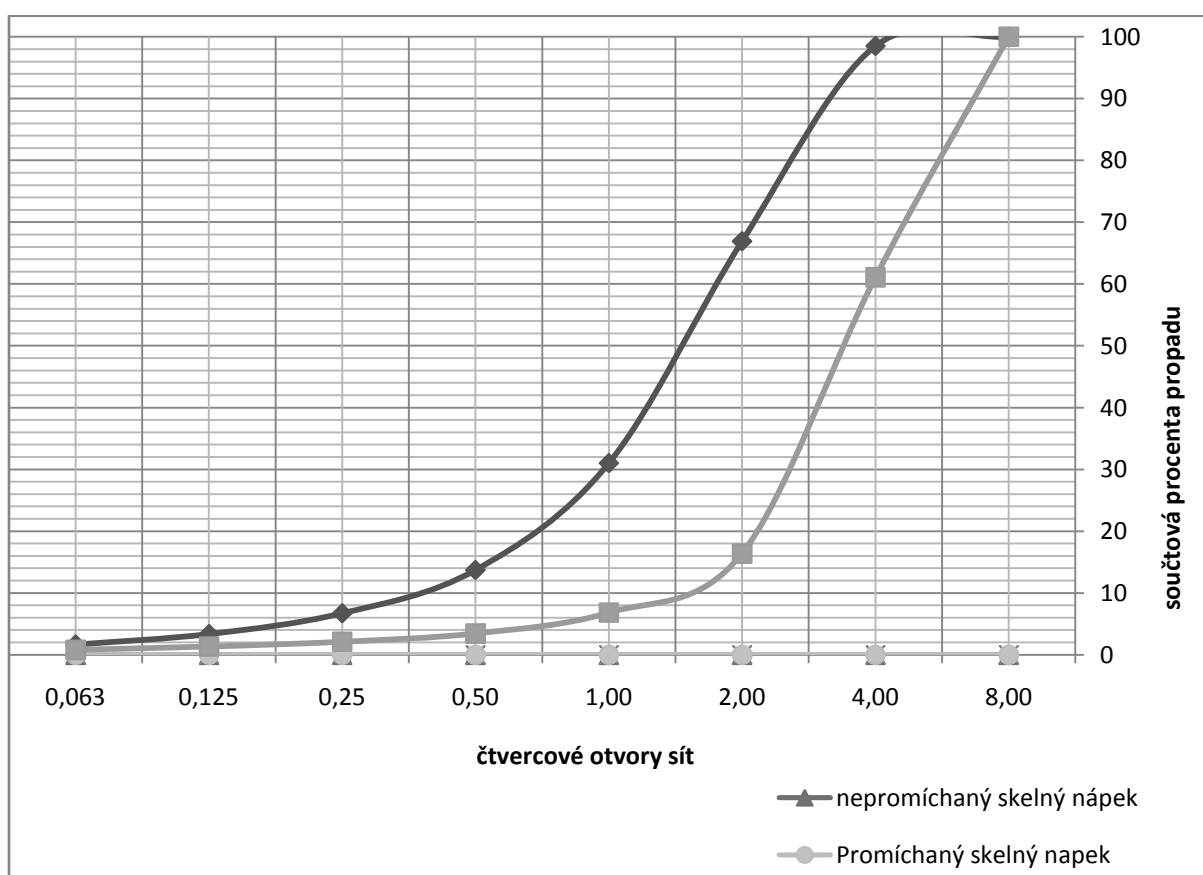
7.1.3 Tvarový index

Tab. 6: Hodnoty tvarového indexu

Frakce Nepromíchaného nápeku	SI	Frakce Promíchaného nápeku	SI
4/8	13	4/8	8
8/16	6	8/16	5

Poznámka: Při míchání skelného nápeku v laboratorní míchačce dochází k ovlivnění tvarového indexu, ostrá nekubická zrna křehkého pórovitého nápeku se zakulacují, což znamená zmenšení obsahu nekubických zrn. Rozdíl při frakci 4/8 je až o 38,5% a při frakci 8/16 se jedná o 16,7%.

7.1.4 Sítový rozbor



Graf. 2: Sítový rozbor - Křivka zrnitosti

7.1.5 Stanovení mrazuvzdornosti

Tab. 7: Procentuální hodnoty úbytku hmotnosti při střídavém zmrazování a rozmrazování

8/16	Úbytek F [%]
Průměrná hodnota	4,15
16/32	Úbytek F [%]
Průměrná hodnota	4,45

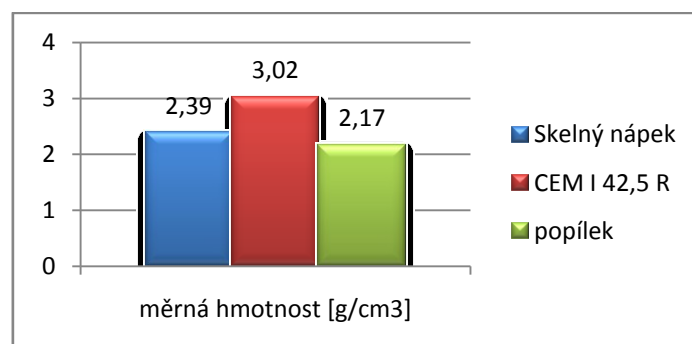
7.2 Jemnozrnný materiál

7.2.1 Stanovení měrné hmotnosti pyknometricky

Výsledné hodnoty jsou srovnány s CEM I 42,5 R a popílkem

Tab. 8: Hodnoty měrné hmotnosti

Materiál	ρ_s [g/cm ³]
Skelný nápek	2,39
CEM I 42,5 R	3,02
Popílek Dětmárovice	2,17



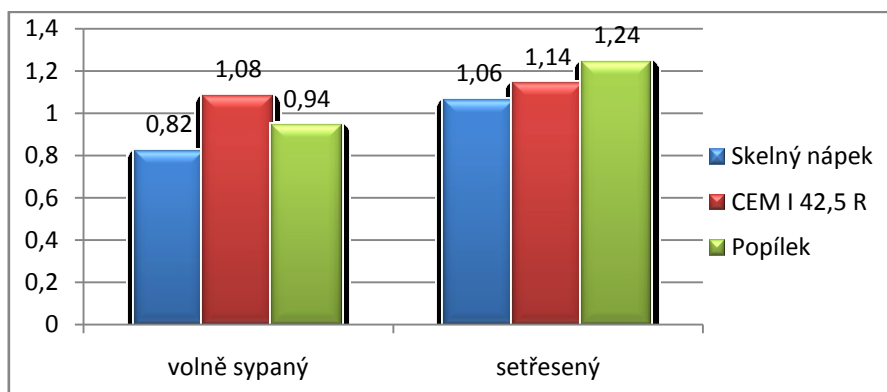
Graf. 3: Výsledné hodnoty měrné hmotnosti

7.2.2 Stanovení sypné hmotnosti

Pro znázornění jsou výsledné hodnoty srovnány s cementem a popílkem

Tab. 9: Výsledné hodnoty sypné hmotnosti volně sypané, setřesené a mezerovitost

Materiál	ρ_b [g/cm ³]	ρ_s [g/cm ³]
Skelný nápek	0,82	1,06
Cement I 42,5 R	1,08	1,14
Popílek Dětmárovice	0,94	1,24



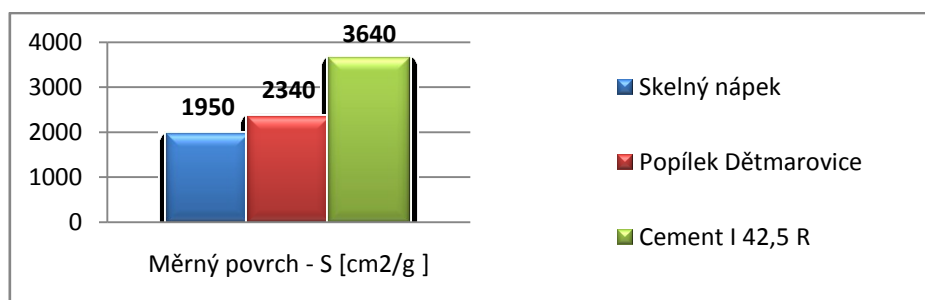
Graf. 4 Hodnoty sypné hmotnosti

7.2.3 Stanovení měrného povrchu práškových látek - Blainova metoda

Výsledné hodnoty měrného povrchu práškového nápeku je srovnán s popílkem a cementem.

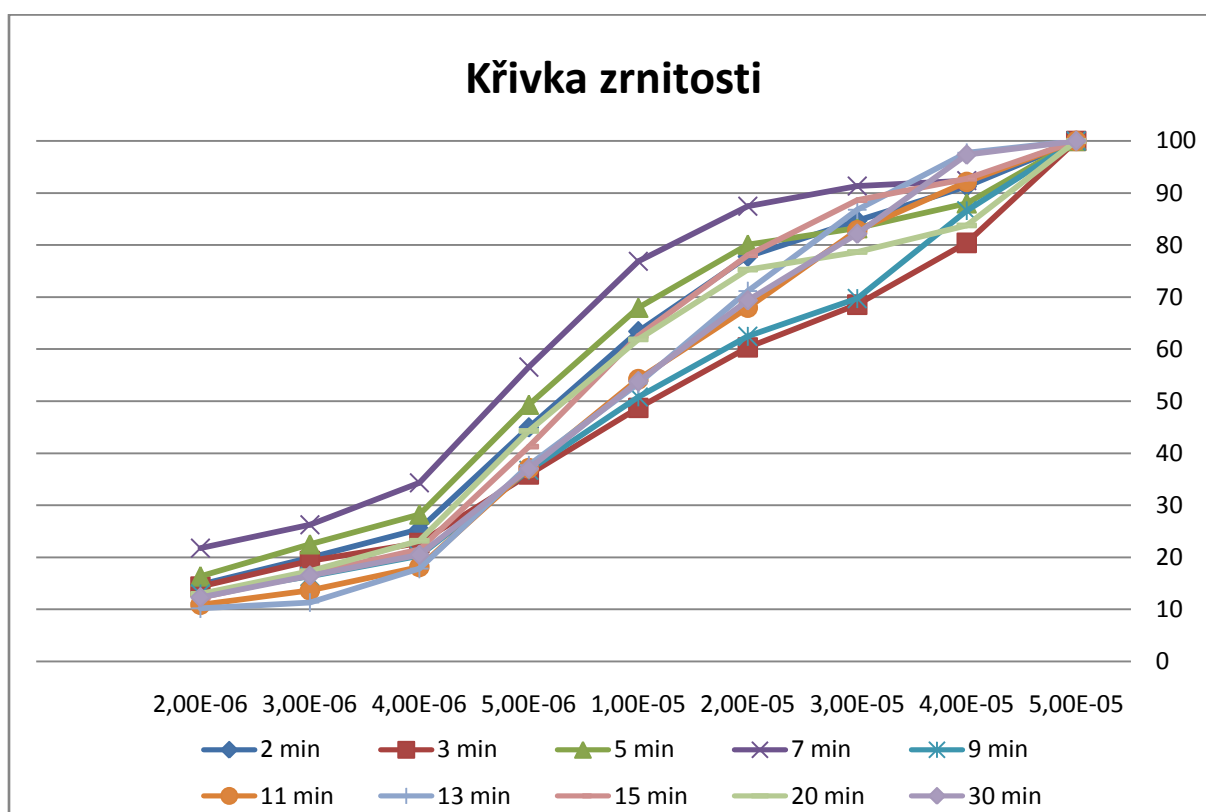
Tab. 10: Výsledné hodnoty měrného povrchu dílčích stavebních materiálů

Materiál	m [g]	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t [s]	S [cm ² /g]
skelný nápek	2,85	38,7	38,9	38,8	1950
popílek	2,3	66	69	67,5	2340
cement	2,79	85,9	82,4	84,4	3640



Graf. 5 Hodnoty měrného povrchu

7.2.4 Stanovení sedimentace - Andreasenova metoda



Graf. 6: Křivka zrnitosti z 10ti zkušebních vzorku

7.2.5 Stanovení pucolánové aktivity - Chapelle test

Tab. 11: Výsledné hodnoty obsahu hydroxidu vápenatého.

Materiál	V1 - nápek	V2 - vápno	mg Ca(OH) ₂
Hodnoty	9,85	10,1	- 67,08

7.2.6 Stanovení normální hustoty - Vicatuv Přístroj

Ozačení vzorku	Vodní součinitel w	Vodní součinitel w [%]
Ref (500g cem42,5 R, 145g vody)	0,29	29,0
1(400g CEM 42,5 R,100g skelný nápek, 145g vody)	0,36	36,0
2(400g CEM 42,5 R,100g skelný nápek, 145g vody)	0,36	36,0

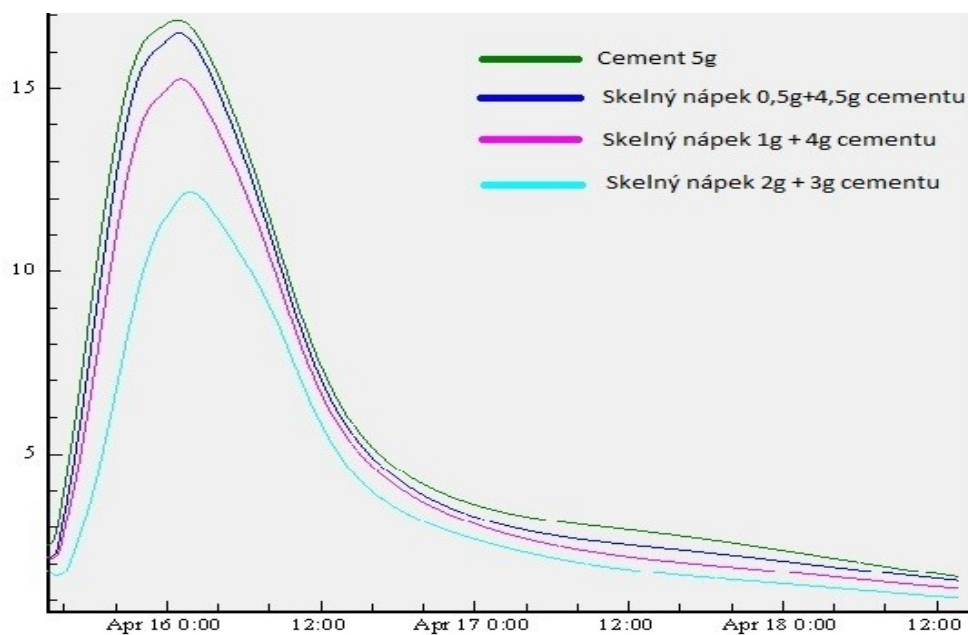
Tab. 12: Výsledné hodnoty normální hustoty při vodním součiniteli

7.2.7 Stanovení doby tuhnutí

Tab. 13: Výsledky stanovení začátku a konec doby tuhnutí

Ozačení vzorku	Začátek tuhnutí [h:min]	Konec tuhnutí [h:min]
Ref (500g cem42,5 R, 145g vody)	2:05	5:25
1(400g CEM 42,5 R,100g skelný nápek, 145g vody)	2:55	6:05

7.2.8 Kalorimetrie



Graf. 7 Znázornění průběhu kalorimetrie skelného nápeku s CEM I 42,5 R

7.3 Chemická analýza

7.3.1 Difrakce výkvětu a skelného nápeku (Měření amorfního podílu)

Výkvět

Kvantitativní analýza, **Wt%**

Tab. 14: Výsledná analýza XRD kvantitativního amorfního podílů s minimální obsahem ZnO

	Množství %
Amorfní podíl	92.38(16)
Kalcit	7.617(95)

Vyhodnocení

Pomocí rentgenové difrakční metody (XRD), lze konstatovat že obsah amorfního podílu ve výkvětu je až 92% a krystalického podílu 8%.

Skelný nápek

Kvantitativní analýza, **Wt%**

Tab. 15: Výsledná analýza XRD kvantitativního amorfního podílů

	Množství %
Amorfní podíl	96.63(31)
α -Cristobalit	3.02(13)
Magnezit	0.36(27)

7.3.2 Prvková analýza skelného nápeku a výkvětu pomocí Spektrometru NITON XL3T GOLDD

Metoda byla provedená pro skelný nápek nepropraný, propraný a 2x pro výkvět.

Tab. 16: Procentuální zobrazení výsledného množství chemických prvků a oxidů

Index	Skelný nápek nepropraný	Skelný nápek propraný	Výkvět	
Reading No	49	50	52	54
Time	27.11.2014 11:39	27.11.2014 11:58	28.11.2014 13:22	28.11.2014 13:45
Type	Mining	Mining	Mining	Mining
Duration	600	486,62	588,45	210
Units	%	%	%	%
Sigma Value	2	2	2	2
Sequence	Final	Final	Final	Final
Prvky				
Ba	0,069	0,05	0,01	
Ba Error	0,003	0,002	0,002	
Bal	39,488	38,115	48,793	46,711
Bal Error	0,083	0,103	0,094	0,228

Zr	0,004	0,004	0,012	0,015
Zr Error	0,001	0,001	0,001	0,001
Rb	0,002	0,002	0,007	0,008
Rb Error	0,001	0,001	0,001	0,001
Zn	0,006	0,008	<LOD	<LOD
Zn Error	0,001	0,001	0,002	0,002
Cu	0,003	0,003	<LOD	<LOD
Cu Error	0,001	0,001	0,002	0,002
Ni	0,003	<LOD	<LOD	<LOD
Ni Error	0,001	0,002	0,002	0,004
Fe	0,099	0,168	<LOD	<LOD
Fe Error	0,003	0,004	0,002	0,006
Mn	0,102	0,109	<LOD	<LOD
Mn Error	0,004	0,004	0,003	0,008
Cr	0,005	0,007	0,004	0,004
Cr Error	0,001	0,001	0,001	0,002
Ti	0,01	0,011	0,007	0,014
Ti Error	0,002	0,002	0,004	0,006
Ca	3,539	3,771	24,886	26,226
Ca Error	0,039	0,04	0,082	0,166
K	15,919	16,267	5,686	5,756
K Error	0,046	0,051	0,027	0,045
Al	0,393	0,479	<LOD	<LOD
Al Error	0,1	0,126	0,187	0,242
P	1,33	1,462	1,711	1,853
P Error	0,017	0,021	0,017	0,023
Si	37,852	38,499	18,273	19,16
Si Error	0,076	0,09	0,073	0,105
Cl	0,135	0,043	0,033	0,037
Cl Error	0,002	0,002	0,002	0,002
S	0,193	0,086	0,045	0,05
S Error	0,005	0,005	0,004	0,006

Mg	0,842	0,914	<LOD	<LOD
Mg Error	0,211	0,265	0,411	0,726
Oxidy				
Al₂O₃	0,743	0,906	0,301	0,312
Al₂O₃ Error	0	0	0	0
SiO₂	81,004	82,388	39,105	41,002
SiO₂ Error	0	0	0	0
MgO	1,398	1,517	0,609	0
MgO Error	0	0	0	0
CaO	4,955	5,28	34,84	36,716
CaO Error	0	0	0	0
SO₃	0,482	0,214	0,113	0,125
SO₃ Error	0	0	0	0
Fe₂O₃	0,141	0,24	0,003	0
Fe₂O₃ Error	0	0	0	0
K₂O	19,262	19,683	6,88	6,965
K₂O Error	0	0	0	0

Tab. 17: Průměrné hodnoty nejvíce obsažených prvků ve skleném nápeku a výkvětu

Chemické prvky	Skelný nápek [%]	Výkvět [%]
Ca	3,7	25,6
K	16,1	5,7
P	1,4	1,8
Si	38	18,7

Tab. 18: Průměrné hodnoty nejvíce obsažených oxidů ve skleném nápeku a výkvětu

Oxidy	Skelný nápek [%]	Výkvět [%]
SiO ₂	81,7	40,1
MgO	1,5	0
CaO	5,1	35,8
K ₂ O	19,5	6,9

Vyhodnocení

Výsledky propraného a nepropraného vzorku jsou přibližně shodné.

Výkvět se skládá převážně z prvků Ca a Si. Hlavní složky tvoří SiO₂ a CaO.

7.3.3 Analýza skelného nápeku a výkvětu pomocí RTG difraktometru D8 Advance firmy Bruker AXS

Výsledky měření

Výsledky semikvantitativní analýzy jsou uvedeny spolu s odhadem náhodné chyby stanovení uvedeny v tabulce. Jako odhad náhodné chyby byl v tomto případě použit trojnásobek vypočtené směrodatné odchylky (pravděpodobnost >99%). V tabulce jsou uvedeny i parametry charakterizující přesnost kvantifikace difrakčního záznamu, resp. přesnost interpolace difrakčního záznamu pomocí vypočteného difrakčního záznamu (R_{wp} , R_{exp}). Hodnota R_{wp} charakterizuje dosaženou chybu interpolace, hodnota R_{exp} je odhadem nejmenší možné chyby při daných podmínkách.

Zhodnocení

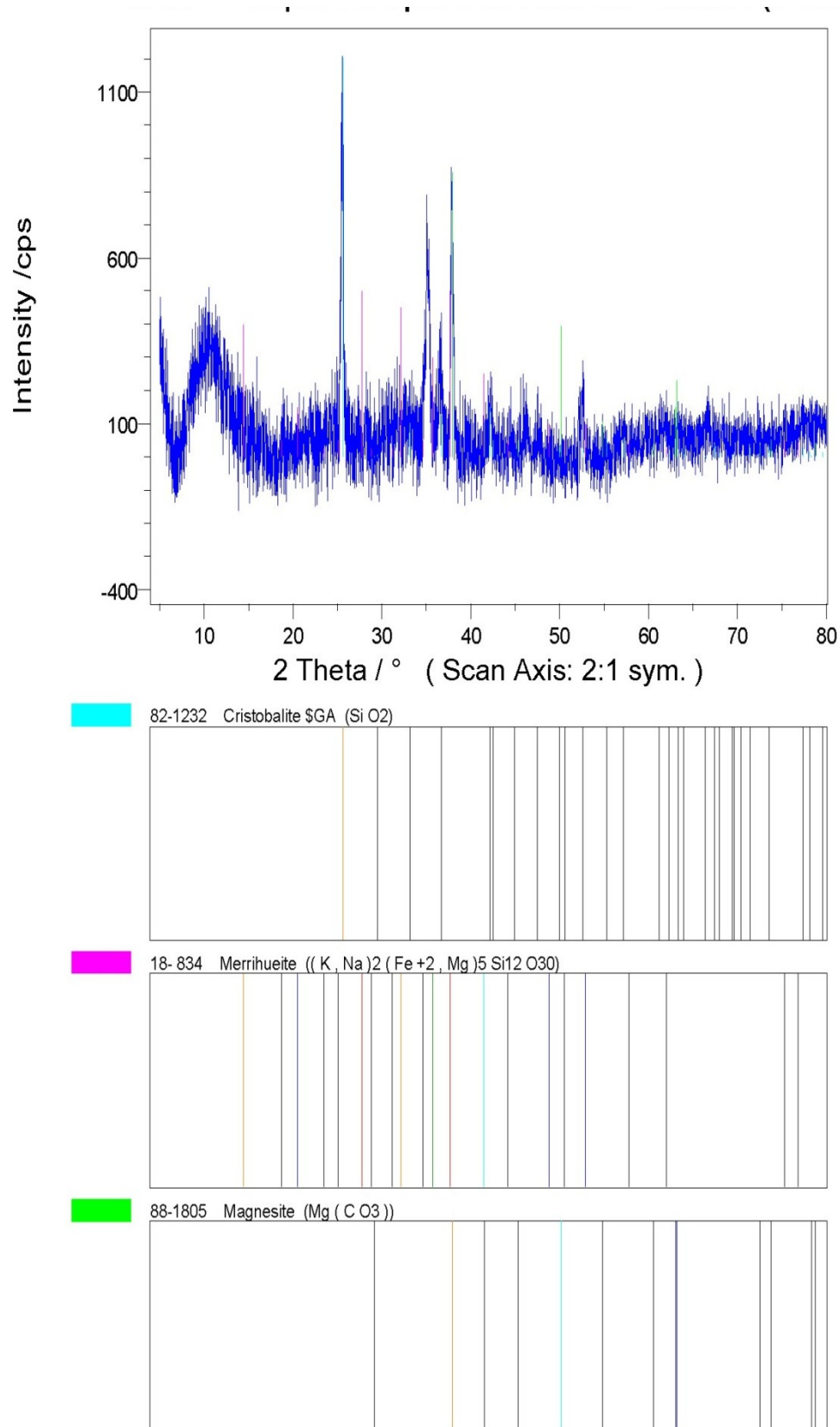
Mineralogické zastoupení jednotlivých fází je uvedeno v Tab. 19

Tabulka č. 19: Výsledky semikvantitativní fázové analýzy skelného nápeku.

fáze	Obsah (% hm $\pm 3\sigma$)	R _{exp}	R _{wp}
Kristobalit	39.7 \pm 1.8	6.33	7.53
Magnezit	22.3 \pm 1.7		
Merrihueit	38.0 \pm 2.3		

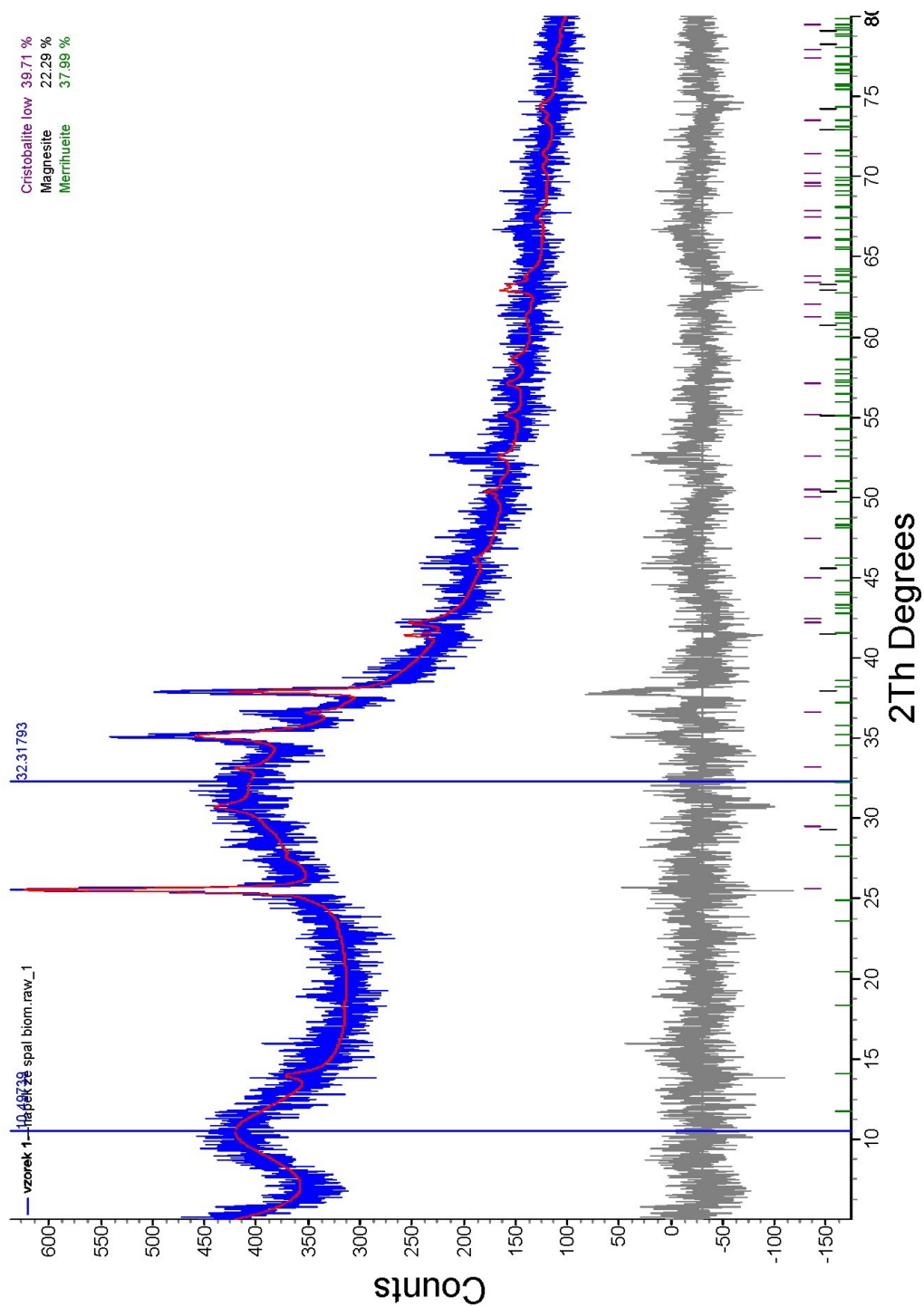
Tab. 20: Výsledky semikvantitativní fázové analýzy výkvětu.

fáze	Obsah (% hm $\pm 3\sigma$)	R _{exp}	R _{wp}
Kalcit	87.00 \pm 0.88	9.47	10.09
Monohydrokalcit	13.00 \pm 0.88		



Graf.8: Kvalitativní vyhodnocení složení vzorku včetně obrazu difrakčního záznamu a výpisu zjištěných difrakčních linií a jejich vyhodnocení.

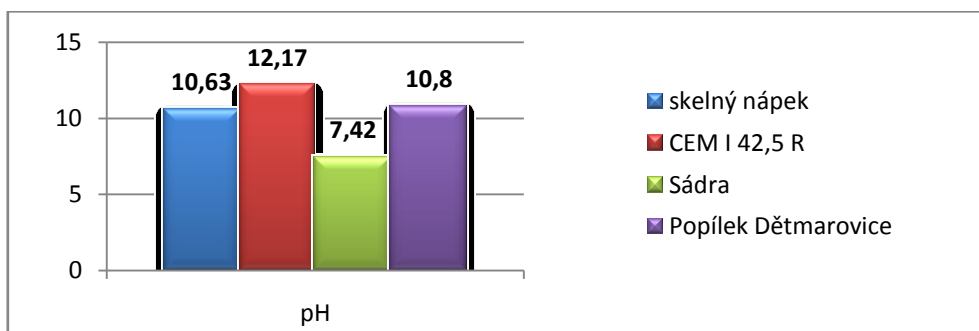
No	PDF-No	d_Fit(A1)	\angle_{Parab}	\angle_{COG}	Limit _{Low}	Limit _{Upp}	I _{Net}	I _{Bgr}	FWHM
1	82-1232	4.0447	25.5718	25.5721	25.2425	25.7434	1204.27	1338.31	0.2689
2	18- 834	2.9733	35.0418	35.0424	34.8776	35.4522	775.70	1374.73	0.3673
3	88-1805	2.7560	37.9065	37.8683	37.6326	38.1335	429.00	1113.27	0.3007
4	18- 834	2.7560	37.9065	37.8683	37.6326	38.1335	429.00	1113.27	0.3007



7.3.4 Stanovení pH skelného nápeku a výluhu

Tab. 21: Výsledné hodnoty pH, rovněž srovnány s cementem, sádrou a vápnem

Vzorek suspenze	Stanovení pH			
	pH -metr		Univerzální indikátorový papírek	
	Teplota	pH	barva	pH
Skelný nápek	23	10,63	zelená	8
CEM I 42,5R	24,2	12,17	modrá	12
Sádra	25,2	7,42	bez změny	> 7
Popílek Dětmárovice	24,6	10,8	modrá	11,5



Graf. 9: Srovnání pH skelného nápeku s cementem, vápnem a sádrou

pH výluhů

Tab.22: pH výluhu Ca(OH)_2 a Na(OH)

	pH	pH po 14ti dnech
nápek sv Ca(OH)_2	11,5	11,5
nápek tm Ca(OH)_2	10,8	10,8
Nápek sv Na(OH)	10,9	10,9
nápek tm Na(OH)	10,9	10,9

Vyhodnocení:

V průběhu 14-21 dnů se pH výluhu v roztocích nezměnil. Tmavý skelný nápek v roztoku $\text{Ca}(\text{OH})_2$ vykazoval částečný výskyt výkvětu.(Obr.60).



Obr. 60:Výskyt výkvětu v roztoku $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Simulace tvorby výkvětů na betonových a geopolymerních zkušebních vzorcích

Na zkušebních tělesech po zkoušce pevnosti v tlaku byla provedena simulace tvorby výkvětů v prostředí: vodný roztok nasycený $\text{Ca}(\text{OH})_2$, pitná voda a destilovaná voda.

Cementový beton

Na zkušebních tělesech ponořených do pitné vody nebo destilované vody se vytvořily menší výrůstky výkvětu, reakce po vyčerpání Ca^{2+} iontů dále nepokračuje, žádné extrémní nárůsty výkvětu.(Obr. 61)

Vzorky umístěné do vodného roztoku hydroxidu vápenatého vykazaly velmi rychlý nárůst novotvarů. (Obr. 62) Vysoká dotace Ca^{2+} iontů podporuje růst novotvarů.

Geopolymer

Na zkušebních tělesech ponořených do pitné vody nebo destilované vody nebyla pozorována žádná reakce ani po 28 dnech ponoření.

Vzorky umístěné do vodného roztoku hydroxidu vápenatého vykázaly nárůst novotvarů. Vytvořily se menší výrůstky výkvětu v oblasti obnaženého kameniva/nápeku. V místech, kde nedošlo k obnažení kameniva nebyl vznik výkvětu pozorován.



Obr. 61: Minimální výskyt výkvětu na zkušebním tělese cementového betonu



Obr. 62: Výkvět vzniklý v roztoku hydroxidu vápenatého na zkušebním tělese cementového betonu



Obr. 63: Výkvět vzniklý v roztoku hydroxidu vápenatého na zkušebním tělese Geopolymeru

7.3.5 Analýza výluhu skelného nápeku

Tab. 25: Výsledky zkoušek původního vzorku

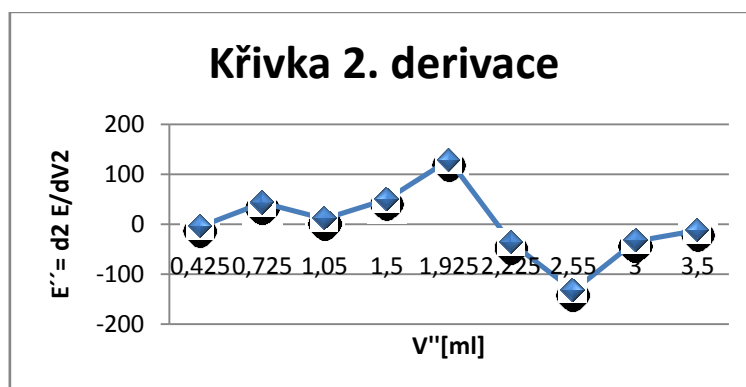
Parametr	Jednotka	Výsledek	Nejistota
Vlhkost - 105°C	[%]	0,05	± 0,01
Volný CaO	[%]	0,12	± 0,02
sulfidy	[%]	0,67	± 0,07

Tab. 26: Výsledky stanovení výluhu

Parametr	Jednotka	Výsledek	Nejistota
pH		10,6	± 0,5
Vodivost	mS/m	206	± 11
uhličitany	mg/l	211	± 10
Al	mg/l	< 0,1	
Ca	mg/l	2,38	± 0,08
Fe	mg/l	0,13	± 0,01

K	mg/l	559	± 28
Mg	mg/l	2,42	± 0,15
Na	mg/l	4,49	± 0,36
P	mg/l	68	± 7
S	mg/l	30	± 4
Si	mg/l	219	± 25

7.3.6 Stanovení chloridů



Graf. 10: Titrační křivka

Pro stanovení obsahu chloridů je důležitá křivka druhé derivace, ze které lze určit celkové množství použitého roztoku dusičnanu stříbrného.

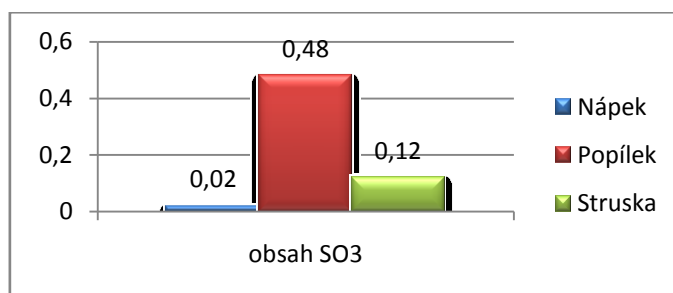
Tab. 23: Výsledné hodnoty obsahu chloridů

Materiál	V'' [ml]	m [g]	cc [%]
Skelný nápek	2,2	2,5516	0,0108

7.3.7 Stanovení obsahu síranů

Tab. 24: Výsledky obsahu síranů SO_3 v procentech

Materiál	m_{10} [g]	m_9 [g]	Obsah SO_3 [%]
Skelný nápek	0,0006	1,0246	0,02
Popílek Dětmárovice	0,0143	1,0235	0,48
Struska	0,0039	1,1232	0,12



Graf. 11: Znárodnění obsahu SO_3 jednotlivých materiálů

7.4 Stanovení mechanických vlastností

Tab. 27: Zobrazení výsledných hodnot, vodního součinitele, VeBe zkoušky a Objemové hmotnosti ztvrdlého betonu

Označení záměsi	Vodní součinitel	VeBe zkouška [s]	Objemová hmotnost ztvrdlého betonu [kg/m^3]			
			150x150x150	100x100x400	100x100x100	150x300
			28dní	28	28	28
6CB18	0,20	16	2180	2130	2170	-
6CB36A	0,33	9	2180	2080	2160	-
6CB36B	0,4	52	2040	2040	2040	2070
7GEO42A	0,58	-	2060	2150	1960 ¹⁾	2070
7GEO42B	0,51	-	2120	2100	2100	2130

Pozn.:

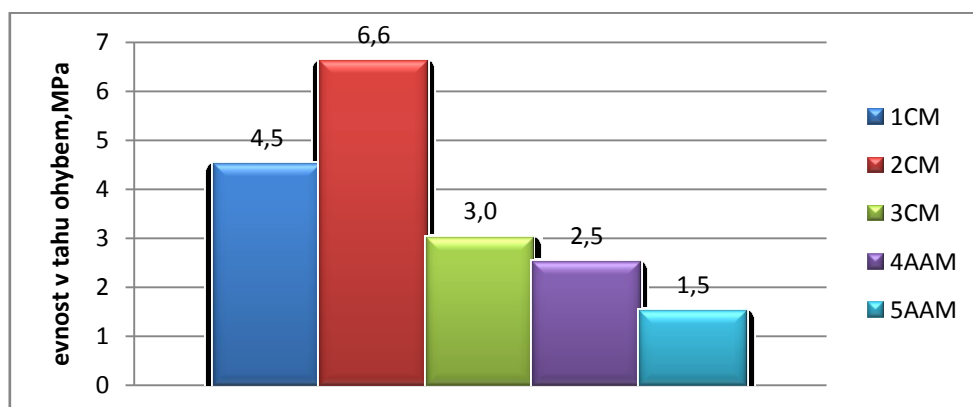
1) - zrání geopolymery v laboratorních podmínkách.

Objemové hmotnosti po 90 dnech zrání byly stejné jako po 28 dnech, pouze u jednoho geopolymery byla jiná. A to u záměsi 7GEO42A zkušebního tělesa 150x150x150 byla objemová hmotnost 1990 kg/m³.

7.4.1 Stanovení pevnosti v tahu za ohybu cementových a alkalicky aktivovaných malt

Tab. 28: Pevnost v tahu za ohybu a objemová hmotnost

Označení	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	Objemová hmotnost [kg/m ³]
1CM	4,5	2210
2CM	6,6	2260
3CM	3,0	2140
4AAM	2,5	2000
5AAM	1,5	1950

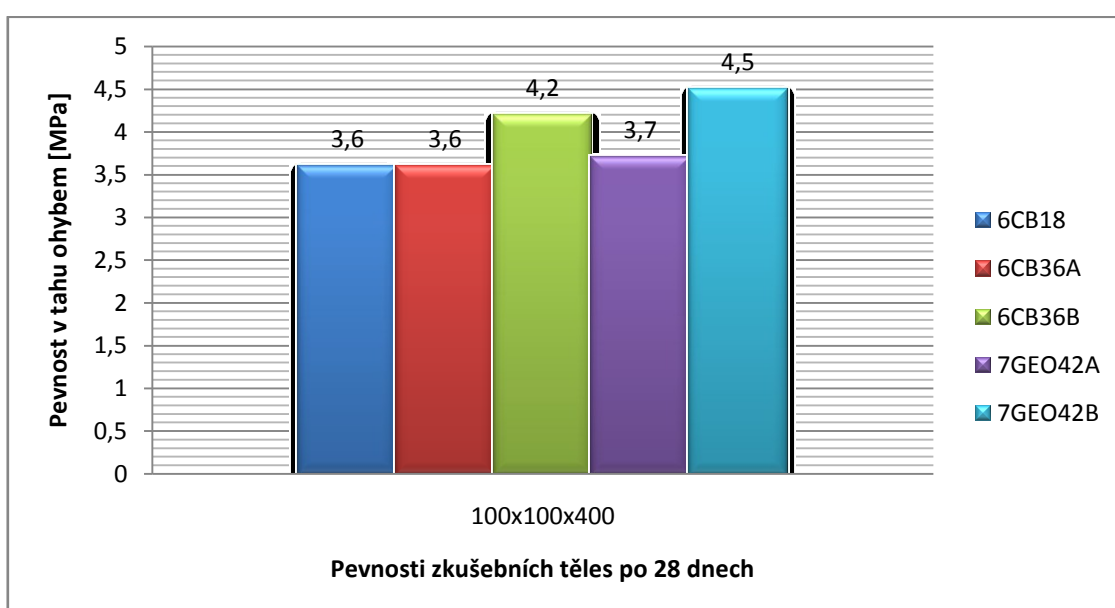


Graf. 12: Zobrazení výsledných pevností v tahu ohybem všech receptur

7.4.2 Stanovení pevnosti v tahu za ohybu cementových betonů a geopolymérů

Tab. 29: Pevnost v tahu za ohybu a objemová hmotnost

Označení	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	Objemová hmotnost [kg/m ³]
6CB18	3,6	2130
6CB36A	3,6	2080
6CB36B	4,2	2040
7GEO42A	3,7	2150
7GEO42B	4,5	2100

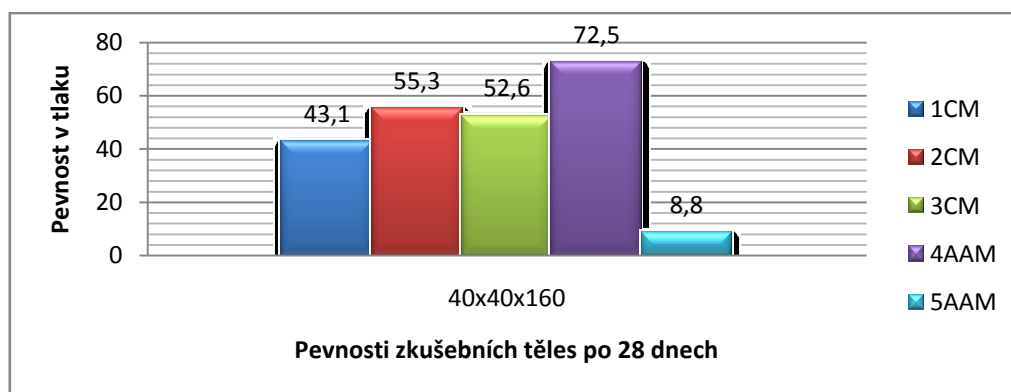


Graf. 13: Zobrazení pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles 100x100x400 po 28 dnech.

7.4.3 Stanovení pevnosti v tlaku cementových a alkalicky aktivovaných malt

Tab. 30: Pevnost v tlaku a objemová hmotnost

Označení	Pevnost v tlaku [MPa]	Objemová hmotnost [kg/m ³]
1CM	43,1	2210
2CM	55,3	2260
3CM	52,6	2140
4AAM	72,5	2000
5AAM	8,8	1950

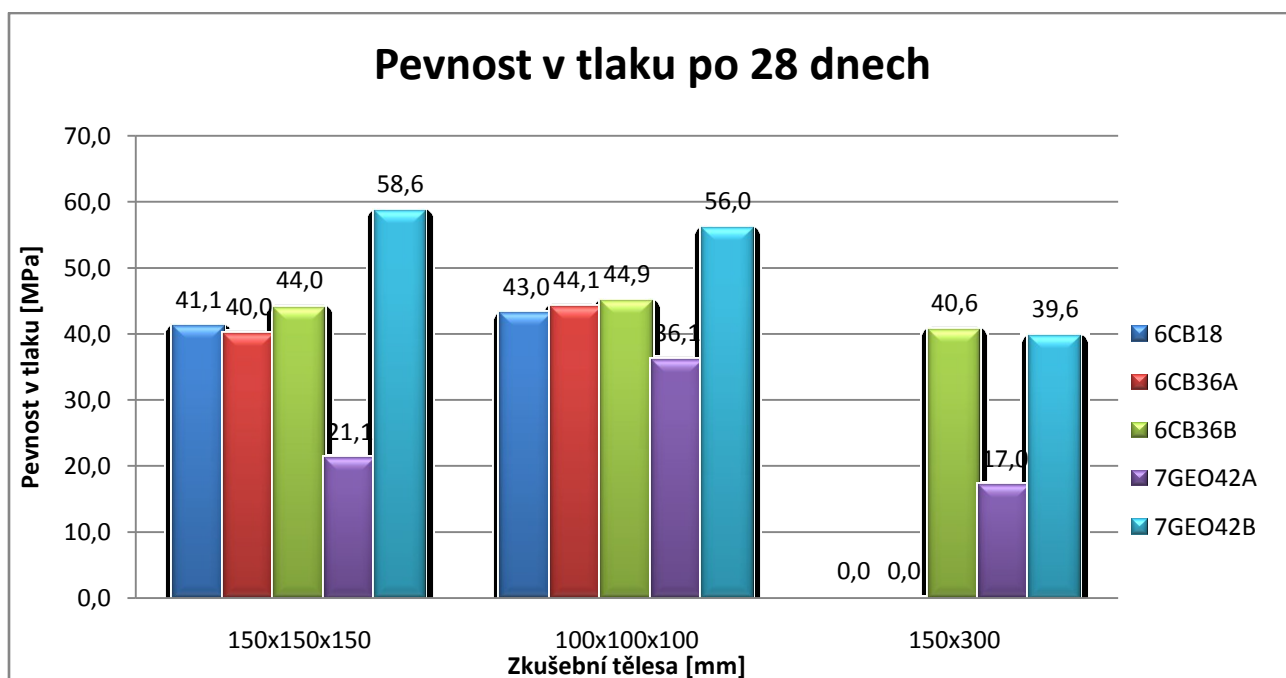


Graf. 14: Zobrazení výsledných hodnot pevnosti v tlaku všech receptur po 28 dnech

7.4.4 Stanovení pevnosti v tlaku cementových betonů a geopolymérů

Tab. 31: Pevnost v tlaku a objemová hmotnost

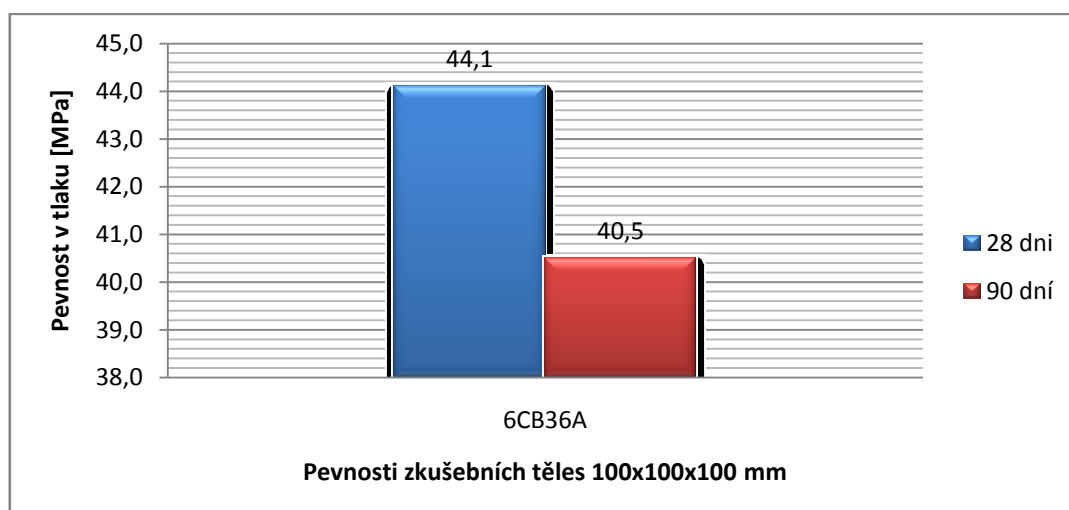
Označení	Zkušební tělesa 150x150x150		Zkušební tělesa 100x100x100		Zkušební tělesa 150x300	
	Pevnost v tlaku [MPa]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Pevnost v tlaku [MPa]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Pevnost v tlaku [MPa]	Objemová hmotnost [kg/m ³]
6CB18	41,1	2180	43,0	2130	-	-
6CB36A	40,0	2180	44,1	2080	-	-
6CB36B	44,0	2040	44,9	2040	40,6	2070
7GEO42A	21,1	2060	36,1	2150	17,0	2070
7GEO42B	58,6	2120	56,0	2100	39,6	2130



Graf. 15: Zobrazení pevnosti v tlaku jednotlivých zkušebních těles po 28 dnech.

Tab. 32: Rozdíl pevnosti v tlaku na zkušebních tělesech cementového betonu 100x100x100 mm po 28 a 90 dnech a objemová hmotnost

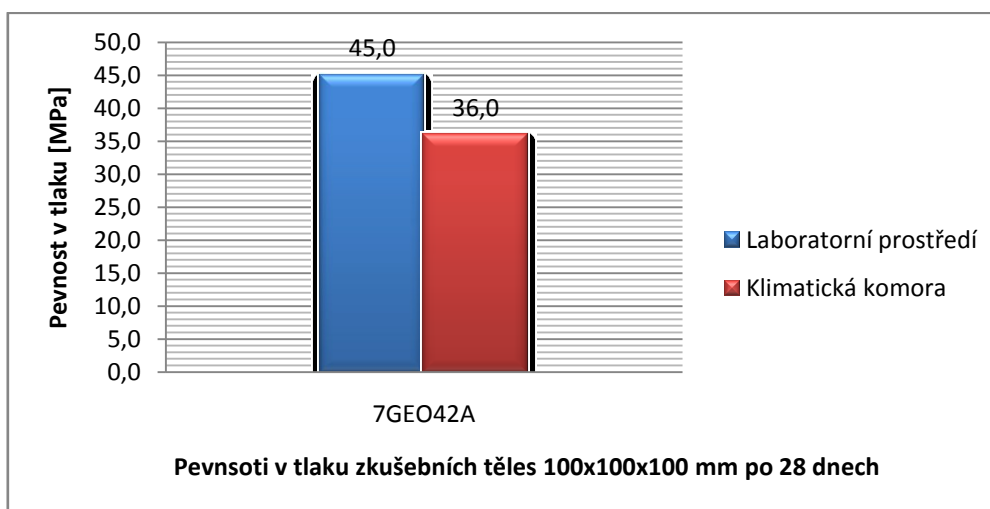
Počet dní	Pevnost v tlaku [MPa]	Objemová hmotnost [kg/m ³]
28	44,1	2080
90	40,5	2100



Graf. 16: Zobrazení rozdílu pevností v tlaku na zkušebních tělesech cementového betonu 100x100x100 mm po 28 a 90 dnech.

Tab. 33: Pevnost v tlaku geopolymery v různých klimatických podmínkách po 28 dnech a objemová hmotnost

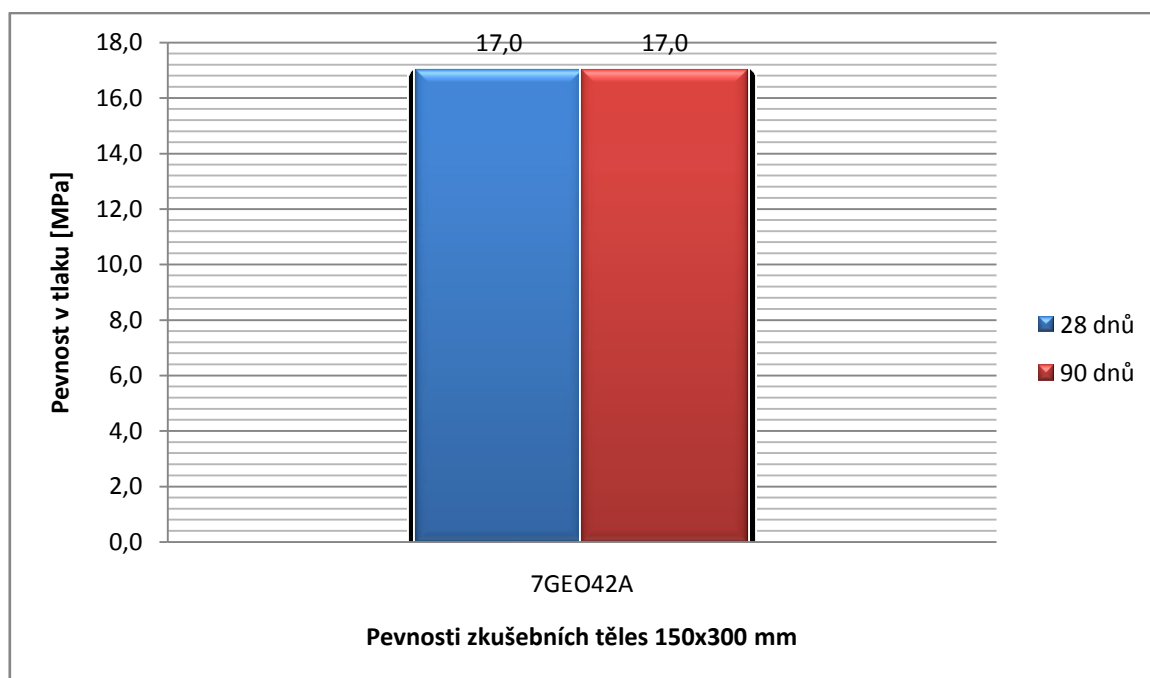
Počet dní	Pevnost v tlaku [MPa]	Objemová hmotnost [kg/m ³]
Laboratorní podmínky	45,0	2150
Klimatická komora	36,0	1960



Graf. 17: Zobrazení pevnosti v tlaku geopolymery v různých klimatických podmínkách po 28 dnech.

Tab. 34: Pevnost v tlaku geopolymery po 28 a 90 dnech, objemová hmotnost

Počet dní	Pevnost v tlaku [MPa]	Objemová hmotnost [kg/m ³]
Laboratorní podmínky	17,0	2070
Klimatická komora	17,0	2070

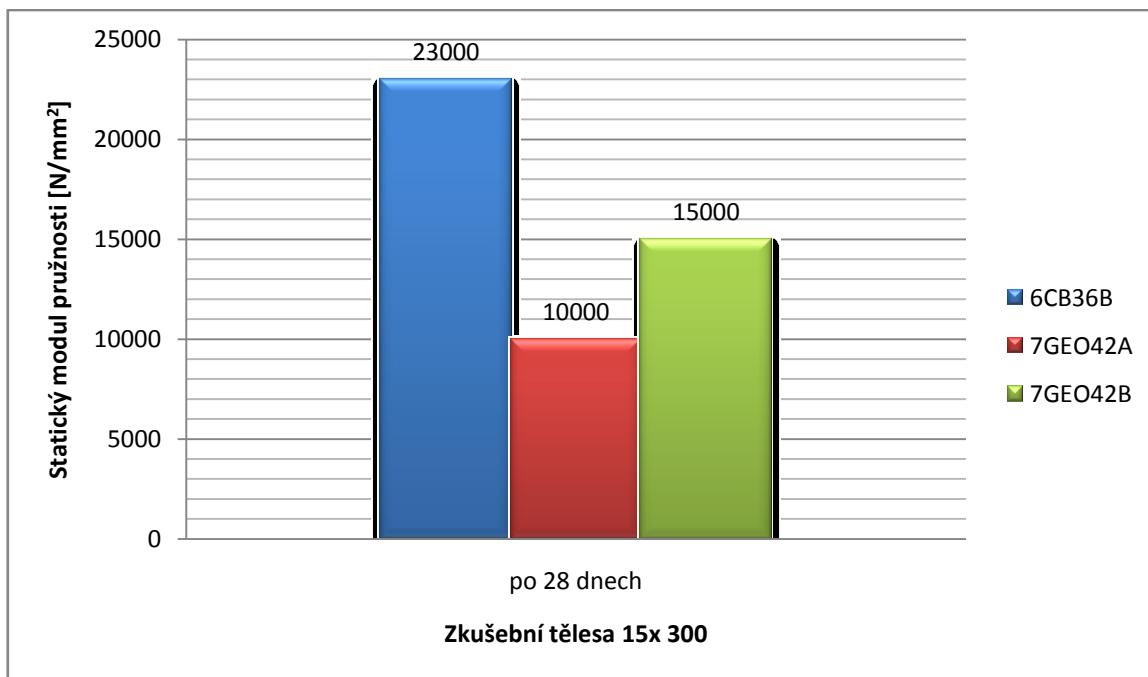


Graf. 18: Zobrazení rozdílů pevností v tlaku zkušebních těles geopolymeru 150x300 mm po 28 a 90 dnech.

7.4.5 Stanovení statického modulu pružnosti

Tab. 35: Statický modul pružnosti a objemová hmotnost

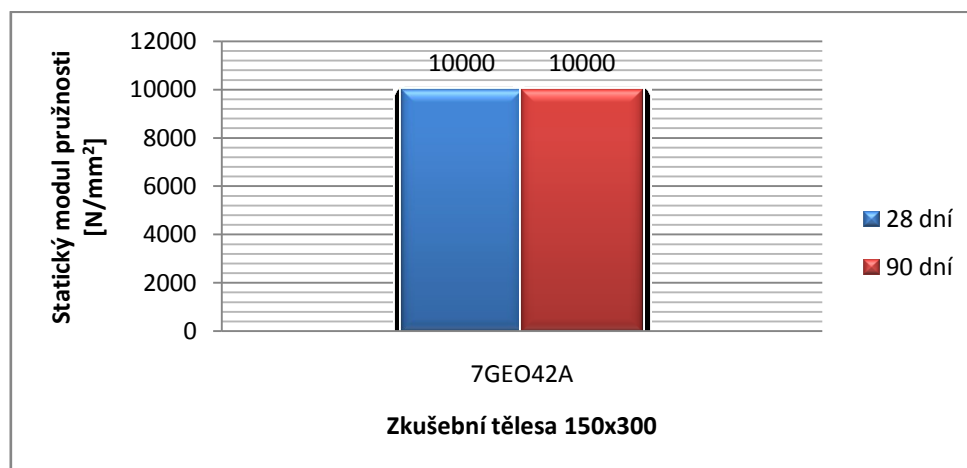
Označení	Modul pružnosti [N/mm ²]	Objemová hmotnost [kg/m ³]
6CB36B	23 000	2070
7GEO42A	10 000	2070
7GEO42B	15 000	2130



Graf. 19: Zobrazení statického modulu pružnosti zkušebních těles 150x300, po 28 dnech.

Tab. 36: Statický modul pružnosti geopolymery a objemová hmotnost

Počet dní	Modul pružnosti [N/mm ²]	Objemová hmotnost [kg/m ³]
28	10 000	2070
29	10 000	2070



Graf. 20: Zobrazení rozdílu statického modulu pružnosti zkušebních těles geopolymery 150x150x150 po 28 a 90 dnech.

8. Závěr

V této práci byly provedeny základní fyzikální, mechanické a chemické analýzy nápeku s ohledem na jeho zamýšlené využití v betonu. Jak bylo popsáno v úvodu práce, jedná se o nápek skelného charakteru s různým obsahem nečistot, z tohoto důvodu byla práce zaměřena na jeho využití jako kameniva do betonu a jemně mletého filleru s účelem zjistit, zda může být tento materiál využit také jako částečná náhrada pojiva. Jednotlivé zkoušky byly rozděleny na plniva, jemně mletý materiál, chemická analýza a mechanické vlastnosti.

V první fázi se pracovalo s kamenivem, jakožto plnivem do betonu, kde byly provedeny zkoušky fyzikálních vlastností kameniva, jako je zdánlivá objemová hmotnost, sypaná hmotnost volně sypaného kameniva, tvarový index, síťový rozbor a mrazuvzdornost. Zdánlivá objemová hmotnost frakce 4-31,5 dosahovala hodnot $1,79 \text{ kg/m}^3$. Sypaná hmotnost volně sypaného kameniva byla provedena pro dvě dílčí frakce a to 0/4, 8/16, které se od sebe významně nelišili. Při míchání betonu v míchačce se viditelně změnil tvar a povrch zrn skelného nápeku, v důsledku obrušování a drcení způsobené rotujícími lopatkami míchačky. Tato zkouška se provedla ještě jednou z odebraného vzorku v míchačce. Podle zjištěných výsledků odebraného vzorku je příznivě ovlivněn tvarový index, což znamená, že zmenšuje obsah nekubických zrn a zakulacuje tvar a povrch zrn. Rozdíl tvarového indexu při frakci 4/8 je až o 61,5% a při frakci 8/16 se jedná o rozdíl 83,3%. Na základě obrušování skelného nápeku v míchačce byl proveden síťový rozbor před a po míchání v míchačce. Dle srovnání křivek zrnitosti je vidět, že při míchání v míchačce se zvýší počet jemnozrnných zrn. Mrazuvzdornost skelného nápeku při 20 cyklech rozmrazování a zmrazování vykazoval úbytek na hmotnosti ve dvou dílčích navážkách kolem 4%.

V druhé fázi se zkoumaly fyzikální vlastnosti jemně mletého filleru, tento materiál byl popsán a v jednotlivých zkouškách srovnán s cementem a popílkem, jakožto zástupců nejběžnějšího pojiva a pucolánu v betonech. Z porovnání měrného povrchu pomocí Blainova přístroje a sedimentační analýzou vychází, že mletím v laboratorním vibračním mlýně se podařilo připravit materiál, který obsahuje většinu zrn v rozmezí $50.10^{-6} \text{ m} - 20.10^{-6} \text{ m}$, kdežto u cementů většina zrn se pohybuje pod 20.10^{-6} m , ale i 10.10^{-6} m . Průměrný měrný povrch zrn nápeku je $1950 \text{ m}^2/\text{kg}$ (3640 u cementu) potvrzuje hrubší zrno tohoto materiálu. U popílku Dětmárovice vycházela většina zrn v rozmezí $30.10^{-6} \text{ m} - 20.10^{-6} \text{ m}$ a rovněž měrný povrch je vyšší než bylo u namletého nápeku.

Jednou z dalších vlastností, které byly stanoveny v rámci této práce je pucolánová aktivita. Ta byla sledována pomocí několika přímých či nepřímých metod. Metodou pomocí Chapelle testu, pevnostními charakteristikami, chemickým složením a kalorimetrickým zhodnocením filleru nápeku. Z výsledků nepřímého stanovení pucolanity vyplývá, že materiál má pucolánové vlastnosti, naproti tomu přímou metodou dle chapelle testu se tato skutečnost neprokázala. Lze si to vysvětlit buď chybou při provádění zkoušení chapelle testu nebo je možné, že tato metoda není příliš vhodná, vzhledem k vysoké reaktivitě nápeku s Ca^{2+} ionty, což mohlo ovlivnit danou zkoušku, která je založena na titraci a spotřebě HCl.

Z hlediska využití materiálu jako pojiva či příměsi do betonu je důležité také jeho pH a chemické složení, zejména obsah chloridů, síranů a jiných látek, které by mohly ovlivnit vlastnosti a trvanlivost betonu nebo betonářské výztuže. Z hlediska pH vychází nápek jako materiál zásaditý (srovnatelný s v betonu běžně využívaným popínkem Dětmárovice), tedy nebude snižovat přirozenou zásaditou inhibici koroze výztuže v betonu. Obsah chloridů ve skelném nápeku je velmi nízký a pohybuje se řádově v setinách % povoleného limitu daného betonářskou normou (ČSN EN 206-1 - Beton - Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda) pro použití příměsí v betonu. Stanoven byl rovněž obsah síranů SO_3 , kde opět vykazuje skelný nápek velmi příznivých hodnot, nižších než u cementů nebo popílků. Limit pro použití příměsí v betonu je 3,5%. Celkový obsah síry ve vzorku činí 30 mg/l a výsledné množství sulfidu je 0,67 %.

Během zrání cementového betonu ve vodním prostředí (vyšší obsah $\text{Ca}(\text{OH})_2$) došlo k tvorbě novotvarů, výkvětů, které byly následně analyzovány. Metodou prvkové analýzy (Spektrometr NITON XL3T GOLDD) se zjistil obsah prvků a oxidů skelného nápeku a výkvětu. Skelný nápek obsahuje vysoké množství křemíku (Si) 38% (81,7% oxidu křemičitého (SiO_2)), jak u propraného tak nepropraného vzorku. Dále byly provedeny chemické analýzy amorfního a krystalického podílu metodou XRD, kde výkvět obsahoval až 92 % amorfního podílu a 8 % krystalického. U skelného nápeku bylo zjištěno 96 % amorfního podílu a 4 % krystalického podílu. Pomocí metody RTG analýzy byly zjištěny minerální obsah krystalických fází skelného nápeku a výkvětu. Ve 4 % skelného nápeku se vyskytují minerální látky kristobalit, magnezit (a merrihueit). Výkvět obsahuje 8 % krystalické fáze, v níž jsou obsazeny minerální látky kalcit a monohydrokalcit.

Z provedených analýz bylo zjištěno, že v nápeku je obsažen amorfni křemík/oxid křemičitý, který v alkalickém prostředí za přítomnosti vody reaguje s alkáliemi a vznikají tak reakční mechanismy popsané v literatuře [51] jako alkalicko křemičitá reakce. (ASR – alkali-silika

reaction). Alkalicko křemičitá reakce kameniva velmi často negativně ovlivňuje kvalitu betonu (tvorba trhlin z důvodů tvorby nových produktů, které vytvářejí vnitřní napětí v betonové konstrukci. V případě reakce nápeku však dochází pravděpodobně k tvorbě výkvětů které jsou tvořeny C-S-H gelem, dochází k masivnímu rozpouštění $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a vázání Ca^{2+} iontů na povrch nápeku za rychlé tvorby novotvarů. Tyto novotvary se projevovaly zejména na povrchu, avšak došlo postupně také k zaplnění pórovité struktury betonu a vyplnění C-S-H gelem. V době trvání diplomové práce nebyl na vzorcích s dobou zrání 48 dní pozorován žádný vliv na mechanické vlastnosti cementového betonu. V případě geopolymery nebyla pozorována žádná reakce ve vodném prostředí, proto lze usoudit, že pro vznik novotvarů je limitní právě obsah Ca^{2+} iontů v materiálu či prostředí, ve kterém se materiál nachází. Je pravděpodobné, že v případě nápeku Ca^{2+} ionty jsou přitahovány k povrchu částic, bez reakce mezi ionty a amorfním SiO_2 , avšak tuto hypotézu je třeba ještě dále zkoumat. Tato problematika ovšem není obsahem této práce a je to námětem pro další výzkum.

Z výsledků provedených analýz vyplývá, že z hlediska popisované nežádoucí reakce za vzniku novotvarů není vhodné využít nápeku jako hrubého či jemného kameniva do cementových betonů, které budou vystaveny vlhkému prostředí. V suchém prostředí ke zmíněným reakcím nedochází a lze tedy nápek použít. Z hlediska využití nápeku je vhodnější matricí alkalicky aktivovaná struska, vzniklý geopolymery velmi dobře chrání nápek ve formě hrubého kameniva a nedocházelo tak k reakci ani v prostředí s vysokou koncentrací Ca^{2+} iontů. Geopolymery s nápekem lze použít i do vlhkého prostředí.

Dále se stanovili mechanické vlastnosti skelného nápeku v cementových betonech a geopolymery. Byly vytvořeny zkušební tělesa o rozměrech 150x150x150, 100x100x100, 100x100x400 a 150x300. Které byly porovnávány v pevnosti v tlaku, v tahu za ohybu a také vlivem doby zrání.

U geopolymery byli vytvořeny dvě záměsi s rozdílným vodním součinitelem. První záměs byla uložena do klimatické komory ($T=60^\circ\text{C}$ $w=90\%$) po dobu prvních dvou dnů tuhnutí a druhá záměs v laboratorních podmínkách. Zkušební tělesa uložena v klimatické komoře měla nepříznivý vliv na pevnost v tlaku. Nebylo tedy prokázáno, že by zvýšená teplota při zrání podpořila vývin pevností geopolymery. Dále byl zkoumán vliv doby zrání geopolymery na pevnosti v tlaku a to po dobu 28 a 90 dnů, kde nebyly shledány výrazné rozdíly mezi získanými hodnotami. Geopolymery v daném složení také vykázal vyšší pevnostní charakteristiky oproti betonům cementovým.

Shrnutí

- Nápek obsahuje velké množství amorfního podílu, krystalickou fázi obsahuje jen minimálně.
- **Pomletý nápek má velice dobré abrazivní vlastnosti, je velmi tvrdý a nedochází při delším mletí ke spékání, proto může být používán např. při čištění mlýnů.**
- Dle norem pro kamenivo ČSN EN 12620 skelný nápek vyhovuje požadavkům pro použití do betonu (norma pro pórovité kamenivo do betonu ČSN EN 13055-1 neuvádí žádné limitní hodnoty), avšak z hlediska působení negativních chemických reakcí a vzniku výkvětů **nápek jako hrubé kamenivo není vhodný do kompozitů s cementovou maticí.**
- **V geopolymery nebyly prokázány negativní reakce vedoucí ke vzniku novotvarů jako u matrice cementové..**
- V práci byla prokázána závislost pevnosti v tlaku na velikosti zkušebního tělesa.
- Nebyl prokázán vliv zvýšené teploty při zrání geopolymery na zvýšení jeho mechanických vlastností, výsledné 28 denní pevnosti se oproti referenčním vzorkům snížily.
- **Využití jemně mletého nápeku jako částečné náhrady za cement je z hlediska mechanických vlastností možné.** Výsledky pomocí Chapelle testu nepotvrdily pucolánovou aktivitu. Nepřímou metodou stanovení pucolanity je ovšem chemická analýza. Pucolánová aktivita závisí především na obsahu reaktivních (amorfních) složek, zároveň má tendenci se zvyšovat úměrně s nárůstem jejich obsahu, míru pucolanity lze tedy také predikovat z poměrného množství reaktivních složek v dané surovině. Například ASTM C 618[52] vyčleňuje pro přírodní pucolány skupinu N, u které má být součet $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ minimálně 70 %. Výsledky mechanických vlastností cementových trámeček modifikovaných jemně mletým nápekem dokazují významné zvýšení pevnostních charakteristik oproti referenčním trámečkům cementovým.
- Nápek je rovněž pravděpodobně možné využít jako expandované kamenivo. Jemně mletý filler se při teplotách kolem 1000°C taví a vytváří pevný a tvrdý sklovitý materiál s pórovitou strukturou. Využití nápeku touto cestou je opět námětem k dalšímu výzkumu.

- Z hlediska ekonomického se prozatím jeví využití tohoto materiálu jako nevhodné. S rozvojem tepláren a elektráren na biomasu lze však předpokládat zvýšená produkce tohoto materiálu, který je nutno skládkovat nebo dále zpracovávat.

9. Literatura

- [1] VOLÁKOVÁ, Pavlína, MÍKA, Martin, KLÁPŠTĚ, Břetislav, VERNER, Vladimír: Biomarová výtovna Źlutice – efektivní propojení praxe s výzkumem. Biom.cz [online]. 2011-11-09 [cit. 2014-11-14]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/biomarova-vytopna-zlutice-efektivni-propojeni-praxe-s-vyzkumem>>. ISSN: 1801-2655.
- [2] SPALOVÁNÍ BIOMASY A TVORBA SPEČENIN A SLITIN POPELA I [online]. [cit. 2014-11-12]. Dostupné z: <http://www.kotleverner.cz/data/sharedfiles/4975/spalovani-biomasy-a-tvorba-specenin-a-slitin-popela-i71.pdf>
- [3] Stavební hmoty: Luboš Svoboda a kolektiv. Bratislava: Jaga group,s. r. o., 2004. ISBN 80-8076-007-1.
- [4] Alkalicko křemičitá reakce - ASR. In: [online]. [cit. 2014-11-13]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/alkalicko-kremicita-reakce-asr>
- [5] Ekologie a nové stavební hmoty a výrobky: IX. konference Výzkumného ústavu stavebních hmot, a. s. Brno: Výzkumný ústav stavebních hmot,a. s., 2005. ISBN 80-239-4905-5.
- [6] Energosádovec. [online]. [cit. 2014-11-13]. Dostupné z: <http://www.cezep.cz/energoadovec.html?id=124>
- [7] Jirásek, Jakub a Vavro, Martin. Anorganická pojiva. [Online] [cit. 2014-11-13]. <http://geologie.vsb.cz/>.
- [8] Antoine-Joseph Lorient. wikipedia.org. [Online] [cit. 2014-11-13]. <http://fr.wikipedia.org/>.
- [9] Historie cementu. Ebeton [online]. [cit. 2014-11-13]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/historie-cementu>

- [10] Výroba cementu. Ebeton [online]. [cit. 2014-11-13]. Dostupné z:
<http://www.ebeton.cz/pojmy/vyroba-cementu>
- [11] Kresta, František. Silikátové technologie - 1. Úvodní přednáška – Ostrava : VŠB-TU Ostrava, FAST, 2014. přednáška.
- [12] ŠKVÁRA, F. Alkalicky aktivované materiály - geopolymery. Praha, 2007. ISBN 978-80-7080-004-1. Dostupné z: <http://www.vscht.cz>. VŠCHT v Praze, Ústav skla a keramiky.
- [13] Davidovits, Joseph. Environmentally Driven Geopolymer Cement Applications. Melbourne : Geopolymer 2002 International Conference, October 28-29, Melbourne, Australia, 2002.
- [14] Boháčová, Jana, Staněk, Stanislav a Vavro, Martin. Možnosti aplikace alkalicky aktivovaných systémů ve stavebnictví. Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské -Technické univerzity Ostrava. č.2, ročník XII, řada stavební. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2012, stránky 65-74.
- [15] SVORA, Petr. FYZIKÁLNĚ MECHANICKÉ VLASTNOSTI GEOPOLYMERNÍHO POJIVA NA BÁZI STRUSKY A POPÍLKU MODIFIKOVANÝCH GUMOASFALTEM. In: [online]. [cit. 2014-11-16]. Dostupné z:
http://www.fce.vutbr.cz/veda/juniorstav2008_sekce/pdf/4_2/Svora_Petr_CL.pdf
- [16] Www.claypolymers.com [online]. 2012 [cit. 2014-11-16]. Dostupné z:
www.claypolymers.com
- [17] Boháčová, Jana. Studium vlivu různých typů plniv na vlastnosti geopolymerních systémů na bázi alkalicky aktivovaných strusek. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2008. Bakalářská práce.

- [18] URBAN, Jan. Možnosti využití vybraných přírodních organických surovin jako plniva stavebních hmot s anorganickou maticí. Ostrava, 2013. Dostupné z: dspace.vsb.cz. Diplomová práce. VŠB-TU O. Vedoucí práce Ing. Filip Khestl, Ph.D.
- [19] Řezník, Bohuslav. Vliv silikátového modulu roztoku aktivátoru na mechanické vlastnosti alkalicky aktivovaného popílku. RECYCLING 2009. Brno : ARSM, 2009, Sv. sborník přednášek 14. ročníku konference, stránky 119-125.
- [20] ZÁKLADNÍ INFORMACE O VODNÍM SKLE. [online]. [cit. 2014-11-17]. Dostupné z: <http://www.vodnisklo.cz/cz/clanky/zakladni-informace-o-vodnim-skle>
- [21] PAVLŮ, Tereza. Zkoušení a vlastnosti recyklovaného kameniva pro použití do betonu Zdroj:<http://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/10265-zkouseni-a-vlastnosti-recyklovaneho-kameniva-pro-pouziti-do-betonu>. Stavba.tzb-info.c [online]. 2013 [cit. 2014-11-17]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/10265-zkouseni-a-vlastnosti-recyklovaneho-kameniva-pro-pouziti-do-betonu>
- [22] Pórovité kamenivo. In: [online]. [cit. 2014-11-17]. Dostupné z: <http://ireferaty.cz/306/2867/Porovite-kamenivo>
- [23] Keramické kamenivo Liapor [online]. [cit. 2014-11-18]. Dostupné z: <http://www.liapor.cz/cz/keramicke-kamenivo-liapor>
- [24] Kresta, František. Silikátové technologie - 5. Výroba cementu – Ostrava : VŠB-TU Ostrava, FAST, 2014. přednáška.
- [25] Jak se vyrábí cement? [online]. [cit. 2014-11-18]. Dostupné z: http://www.heidelbergcement.com/cz/cs/country/produkty/cement/vyroba_cementu.htm
- [26] Kjótský protokol k Rámcové úmluvě OSN o změně klimatu. [online]. [cit. 2014-11-19]. Dostupné z: http://www.mzp.cz/cz/kjotsky_protokol

- [27] HANUS, Bc. Vlastimil. Tavení popele z biomasy. Brno, 2010. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/18742/dipomka%20dod%C4%9BI%20pro%20el.%20odevzdani.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Diplomová práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. Martin Lisý, Ph.D.
- [28] VAŠEK, Tomáš. Vliv elektrárenských popílků na trvanlivost betonů. Brno, 2012. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/8786/10111.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Bakalářská práce. VUT Brno. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
- [29] ČSN EN 1097-6. Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti, Příloha C. únor 2014. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [30] ČSN EN 1097-3. Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 3: Stanovení sypané hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva. srpen 1999. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [31] ČSN EN 933-4. Zkoušení geometrických vlastností kameniva- Část 4: Stanovení tvaru zrn - Tvarový index. říjen 2008. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [32] ČSN EN 933-1. Zkoušení geometrických vlastností kameniva- Část 1: Stanovení zrnitosti - Sítový rozbor. červen 2012. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [33] ČSN EN 13055-1. Pórovitého kamenivo - Část 1: Pórovité kamenivo do betonu, malty a injektážní malty. Duben 2004. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [34] ČSN 72 2113 (722113). Stanovení měrné hmotnosti cementu. Duben 1989. Praha: Český normalizační institut, 1989.
- [35] ČSN EN 12620+A1. Kamenivo do betonu. Listopad 2008. Praha: Český normalizační institut, 2008.

- [36] ČSN EN 196-3+A1. Metody zkoušení cementu - Část 3: Stanovení dob tuhnutí a objemové stálosti. Srpen 2009. Praha: Český normalizační institut, 2009.
- [37] ČSN EN 196-6. Metody zkoušení cementu - Část 6: Stanovení jemnosti mletí. Červenec 2010. Praha: Český normalizační institut, 2010.
- [38] ČSN 72 1127 (721127). Stanovení zrnitosti keramických látek sedimentací. 1983. vyd. Praha: Český normalizační institut, 1983.
- [39] ČSN EN 196-5 (722100). Metody zkoušení cementu - Část 5: Zkoušení pucolanity pucolánových cementů. 2011. vyd. Praha: Český normalizační institut, 2011.
- [40] Wwww.metakaolin.info. [online]. [cit. 2014-05-06]. Dostupné z: <http://metakaolin.info/quality-criteria/chapelle-test.html>
- [41] ČSN EN 196-8 (722100). Metody zkoušení cementu - Část 8: Stanovení hydratačního tepla - Rozpouštěcí metoda. Září 2010. Praha: Český normalizační institut, 2010.
- [42] ČSN EN ISO 787-9 (670520). Všeobecné metody zkoušení pigmentů a plniv - Část 9: Stanovení hodnoty pH vodné suspenze. Prosinec 1997. Praha: Český normalizační institut, 1997.
- [43] ČSN EN 12457-4 (83 8005) -Charakterizace odpadů - Vyluhování - Ověřovací zkouška vyluhovatelnosti zrnitých odpadů a kalů - Část 4: Jednostupňová vsádková zkouška při poměru kapalné a pevné fáze 10 l/kg pro materiály se zrnitostí. Srpen 2003. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [44] ČSN EN 14629 (732155). Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Zkušební metody - Stanovení obsahu chloridů v zatvrdlém betonu. Červenec 2008. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [45] ČSN EN 196-2 (722100). Metody zkoušení cementu - Část 2: Chemický rozbor cementu. Prosinec 2013. Praha: Český normalizační institut, 2013.

- [46] ČSN EN 196-1 (722100). Metody zkoušení cementu - Část 1: Stanovení pevnosti. Listopad 2005. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [47] ČSN EN 12390-5. Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles. Říjen 2009. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [48] ČSN EN 12390-3 ZMĚNA Z1. Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Listopad 2012. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [49] ČSN ISO 6784. Beton. Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku. Únor 1993. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1993.
- [50] ČSN EN 13925-1. Nedestruktivní zkoušení - Rentgenová difrakce polykrystalických a amorfních materiálů - Část 1: Všeobecné zásady. Září 2009.
- [51] Alcalita-silica Reactivity: An Overview of Research. [Http://onlinepubs.trb.org/](http://onlinepubs.trb.org/) [online]. May 1993. Washington, DC, 1993 [cit. 2014-11-12]. Dostupné z: <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/shrp/SHRP-C-342.pdf>
- [52] ASTM C618-12a. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. 15.12.2012. United States: Copyright © ASTM International, 2012.
- [53] Přístrojové vybavení Centra nanotechnologií [online]. [cit. 2014-11-17]. Dostupné z: <http://www.vsb.cz/9360/cs/pristrojove-vybaveni/#1>
- [54] REFERENCE: DONATELLO, S., TYRER, M., CHEESEMAN, C. R. Comparison of test methods to assess pozzolanic activity. Cement and Concrete Composites. 2010, vol. 32, s. 121-127.

- [55] REFERENCE: BAREK, Jaroslav. Pucolánová aktivita oxidu křemičitého. Brno, 2014. 78 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav chemie. Vedoucí práce prof. RNDr. Pavla Rovnaníková, CSc.
- [56] BAREK, Jaroslav. Pucolánová aktivita oxidu křemičitého. Brno, 2014. 78 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav chemie. Vedoucí práce prof. RNDr. Pavla Rovnaníková, CSc.

Seznam obrázků:

- Obr.1: Zdroj: vlastní
- Obr.2: Zdroj: vlastní
- Obr.3: Zdroj: vlastní
- Obr.4: Zdroj: vlastní
- Obr. 5: Zdroj: vlastní
- Obr. 6: Zdroj: vlastní
- Obr. 7: Zdroj: vlastní
- Obr. 8: Zdroj: Vlastní
- Obr. 9: Zdroj: <http://www.cactusmineral.wbs.cz/strusky.html>
- Obr. 10: Zdroj: <http://www.cactusmineral.wbs.cz/strusky.html>
- Obr. 11: Zdroj: <http://www.cactusmineral.wbs.cz/strusky.html>
- Obr. 12: Zdroj: <http://www.remei.cz/aktuality.html?id=37>
- Obr. 13: Zdroj: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pantheon_Rome_\(1\).jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pantheon_Rome_(1).jpg)
- Obr. 14: Zdroj: Přednáška: Technologie stavebních dílců I,Cement
- Obr. 15: Zdroj: Přednáška: Technologie stavebních dílců I,Cement
- Obr. 16: Zdroj: <http://www.cement.cz/online/cz/Domcstrnka/Ospole269nosti/Profilfirmy.html>
- Obr. 17: Zdroj: <http://desap.cz/>
- Obr. 18: Zdroj: Přednášky: Silikátové technologie,Cement výroba
- Obr. 19: Zdroj: Přednášky: Silikátové technologie,Cement výroba
- Obr. 20: Zdroj: Přednášky: Silikátové technologie,Cement výroba
- Obr. 21: Zdroj: Přednáška: Technologie stavebních dílců I,Cement
- Obr. 22: Zdroj: Přednáška: Technologie stavebních dílců I,Cement

- Obr. 23: Zdroj: Přednáška: Technologie stavebních dílců I, Cement
- Obr. 24: Zdroj: http://old.vscht.cz/sil/pojiva/geo_2007.pdf
- Obr. 25: Zdroj: http://old.vscht.cz/sil/pojiva/geo_2007.pdf
- Obr. 26: Zdroj: <http://egypt.vdetailech.cz/cs/katalog-objektu/pamatky/pyramidy-v-gize>
- Obr. 27: Zdroj: http://old.vscht.cz/sil/pojiva/geo_2007.pdf
- Obr. 28: Zdroj: <http://www.izolace-ecobeton.cz/podrobne-informace/vodni-sklo.php>
- Obr. 29: Zdroj: Vlastní
- Obr. 30: Zdroj: <http://www.ebeton.cz/pojmy/kamenivo>
- Obr. 31: Zdroj: <http://obchod.liapor.cz/keramicke-kamenivo-keramzit-liapor-4-8-mm-50-l>
- Obr. 32: Zdroj: http://www.betonserver.cz/_cz/images/foto/foto7_10470.jpeg
- Obr. 33: Zdroj: <http://stavebni-technika.cz/clanky/tezba-sterkopisku-z-vody-v-piskovne-kolin/>
- Obr. 34: Zdroj: <http://agloporit.cz/lehke-umele-kamenivo/>
- Obr. 35: Zdroj: <http://agloporit.cz/lehke-umele-kamenivo/>
- Obr. 36: Zdroj: <http://mujweb.cz/starahut/experimenty/popis.htm>
- Obr. 37: Zdroj: <http://www.drevostavby.cz/cs/drevostavby-archiv/stavba-drevostavby/izolace/2238-perlit-je-darem-prirody>
- Obr. 38 : Zdroj: vlastní
- Obr. 39 : Zdroj: vlastní
- Obr. 40 : Zdroj: vlastní
- Obr. 41 : Zdroj: vlastní
- Obr. 42 : Zdroj: vlastní
- Obr. 43 : Zdroj: http://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=malty_cement_zk
- Obr. 44: Zdroj: <http://www.bas.cz/innov-x-systems/alpha.php>
- Obr. 45: Zdroj: <http://www.bruker.com/products/x-ray-diffraction-and-elemental-analysis/x-ray-diffraction/d8-advance/overview.html>
- Obr. 46: Zdroj: vlastní
- Obr. 47: Zdroj: vlastní
- Obr. 48: Zdroj: <http://www.betonsystem.cz/images/BS-VIB-03A.jpg>
- Obr. 49: Zdroj: vlastní
- Obr. 50: Zdroj: vlastní

Obr. 51: Zdroj: vlastní
Obr. 52: Zdroj: vlastní
Obr. 53: Zdroj: vlastní
Obr. 54: Zdroj: vlastní
Obr. 55: Zdroj: vlastní
Obr. 56: Zdroj: vlastní
Obr. 57: Zdroj: vlastní
Obr. 58: Zdroj: vlastní
Obr. 59: Zdroj: vlastní